COLLECTION PAYOT

LA T. S. F.

Les premières télégraphies. — Notions d'électromagnétisme. — Télégraphie sans fil. — Téléphonie sans fil.

PAR

EDOUARD BRANLY

MEMBRE DE L'INSTITUT



TABLE DES MATIÈRES

LES PREMIÈRES TÉLÉGRAPHIES

Une transmission très rapide de messages à distance se nomme une *télégraphie*. Dès les temps les plus reculés, entre des localités parfois éloignées, mais restant en vue, des nouvelles s'échangeaient optiquement, au moyen de signaux conventionnels, tels que feux allumés, déplacements d'objets apparents. Ces antiques procédés ne furent que très lentement perfectionnés. A la fin du XVIIIe siècle, on regardait comme un grand progrès une manœuvre visible de pièces de bois de diverses formes. Dans ce système de *télégraphie aérienne*, dû à *Claude Chappe*, resté en usage en France, dans certains cas, jusqu'au milieu du XIXe siècle, chaque signal était répété de proche en proche entre des postes échelonnés, distants en moyenne de dix kilomètres. Ce procédé, peu rapide, n'était applicable qu'en temps clair.

Au début du XIXe siècle, la merveilleuse découverte de la *pile de Volta* pouvait faire entrevoir pour les communications lointaines des ressources inattendues. L'utilisation des divers effets du courant électrique était de nature à donner naissance à différents systèmes de télégraphie électrique. C'est ainsi que vers 1835, notre télégraphie électrique usuelle fut organisée avec la plupart de ses avantages actuels. Depuis lors, par un fil métallique qui réunit deux points quelconques du globe terrestre, une correspondance presque instantanée est expédiée à toute

heure, la nuit comme le jour, sans souci des variations météorologiques. Les fils de circulation des dépêches couvrent d'un réseau serré toutes les régions habitées. Protégés par une enveloppe isolante, ils traversent les mers, ils contournent les montagnes, ils assurent pratiquement le secret. Suspendus à quelques mètres au-dessus du sol, le long des routes, ils nous sont familiers, et, jusqu'à ces dernières années, nous les estimions indispensables.

Il y avait, pourtant, des cas où cette télégraphie était impraticable. Sur un navire qui s'éloigne, peut-on songer à dérouler un fil qui conserve une attache avec le port de départ ? Les seules télégraphies possibles, dans ces circonstances, ne pourraient être que des télégraphies sans fil de liaison et l'intervention de l'un des éléments apparents dans lesquels le navire est plongé, air ou eau, avait été seule envisagée. Or, par l'air ou par l'eau, un son ne reste jusqu'ici perceptible que sur un nombre fort restreint de kilomètres. D'autre part, si, à travers une atmosphère très pure, des phares lumineux s'aperçoivent d'assez loin, la brume réduit parfois outre mesure leur rayonnement, et, en tout cas, la convexité de notre globe limite forcément leur portée. En dehors des *télégraphies acoustiques et optiques*, on attend peu de certaines télégraphies électriques sans fil de liaison qui empruntent l'eau ou le sol comme intermédiaire, car l'absorption par le milieu de transmission restreint très vite la propagation.

La *télégraphie sans fil de ligne* dont il sera question ici, est électrique ; mais la nature spéciale de son milieu de transmission lui confère des propriétés exceptionnelles. Malgré la dissémination de son énergie initiale, grâce à la sensibilité surprenante des appareils de réception, elle fonctionne à toute distance comme la télégraphie

électrique usuelle. Elle est rayonnante à la façon de la télégraphie optique, mais elle franchit, en les traversant ou en les contournant, des obstacles qui arrêtent la lumière. Ses propriétés et l'importance de son rôle actuel lui ont fait réserver la dénomination de *radiotélégraphie*.

Comme cette nouvelle télégraphie, née il y a un quart de siècle, a emprunté à la télégraphie électrique usuelle avec fil de ligne certains dispositifs de son fonctionnement, son étude est facilitée par la comparaison des deux télégraphies. D'autre part, afin d'éviter au lecteur des incertitudes pour la définition et l'adaptation d'expressions techniques, un rapide exposé des phénomènes physiques qui interviennent dans les deux modes de transmission va tout d'abord être présenté.

NOTIONS D'ÉLECTROMAGNÉTISME

AIMANTS

Les *aimants* usuels sont des barreaux d'acier auxquels on a donné la propriété d'attirer le fer. Cette attraction s'exerce surtout par deux régions polaires, voisines de leurs extrémités.

Un aimant NS qu'on soutient par son centre de gravité pour le soustraire à l'action de son poids (fig. 1) prend, en un même lieu, une direction fixe, qui lui est imposée par deux forces égales, parallèles entre elles, et de sens contraires, nommées *forces magnétiques terrestres*. Ces forces sont appliquées à l'aimant en deux points qui sont appelés les *pôles* de l'aimant. La ligne qui joint les deux pôles, dite *axe magnétique* du barreau, s'oriente suivant la direction de la force magnétique terrestre du lieu.

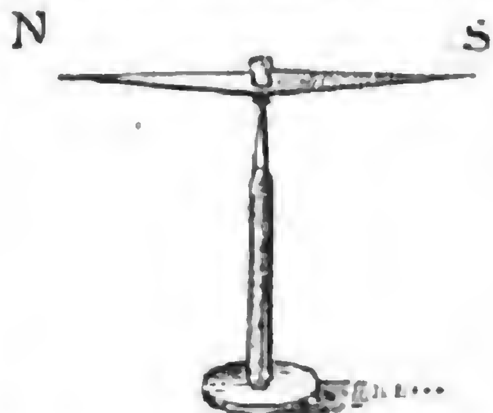


Fig. 1.

On appelle *méridien magnétique* d'un lieu le plan vertical qui contient la direction de la force magnétique terrestre en ce lieu. Une aiguille aimantée mobile horizontalement au-dessus d'un cercle divisé constitue une *boussole*.

L'axe magnétique d'un aimant se dirige à peu près du Nord au Sud. L'extrémité N qui pointe vers le Nord est toujours la même, elle contient le *pôle nord*. Le *pôle sud* est à l'extrémité opposée S. Si deux aimants sont mis en présence, leurs pôles respectifs de même nom exercent l'un sur l'autre une action répulsive ; les pôles de noms contraires s'attirent.

Un espace dans lequel s'exercent des forces magnétiques est qualifié *champ magnétique*. Un champ magnétique est dit *uniforme* quand, en tous ses points, la résultante des forces magnétiques est constante en grandeur, direction et sens. En tout espace assez restreint, le champ magnétique terrestre est *uniforme*. La trajectoire que suivrait un pôle nord, supposé libre d'obéir à la force magnétique en tout point d'un champ magnétique, s'appelle *ligne de force magnétique*. Un pôle sud suivrait la même trajectoire en sens inverse. L'axe magnétique d'une aiguille aimantée, libre, s'oriente en chaque point d'un champ magnétique suivant la ligne de force qui passe par ce point. Souvent, au lieu de représenter une force magnétique, $F=nf$ par n longueurs égales à l'unité de force f, portées bout à bout dans le sens de la force (fig. 2), il est commode de la représenter par n longueurs parallèles ayant la grandeur et la direction de l'unité f, et distribuées uniformément sur une surface d'un centimètre carré perpendiculaire à la direction de la force. Leur nombre, par centimètre carré, croît proportionnellement à la force magnétique. L'ensemble de ces forces parallèles est nommé un *flux*



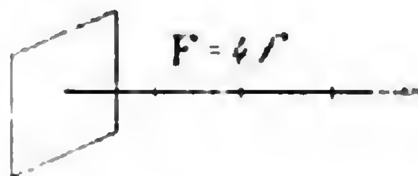


Fig. 2.

de force. Quand une force F agit uniformément sur une surface S, perpendiculaire à sa direction, son flux à travers cette surface est SF.

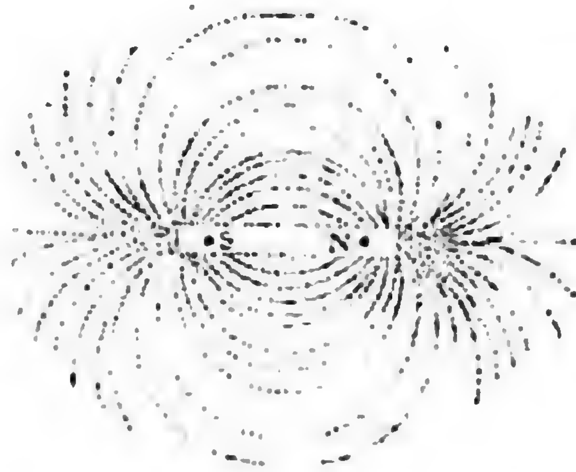


Fig. 3.

Dans un champ magnétique uniforme, le flux de force magnétique est formé de lignes de force parallèles entre elles et équidistantes.

Les lignes de force qui relient à travers le milieu ambiant la région nord d'un barreau à sa région sud, peuvent être figurées matériellement par des files de grains de limaille de fer qui se distribuent d'une façon régulière autour du barreau et forment ce que l'on appelle le *spectre magnétique* de l'aimant (fig.3). On a imaginé que ces lignes ne s'arrêtent pas à la surface du barreau, mais se continuent dans la masse même du métal en allant de sa région sud à sa région nord (fig.4). On dit alors que les lignes de force magnétique forment des courbes fermées, les unes au dessus, les autres au dessous de la droite NS qui joint les deux pôles.

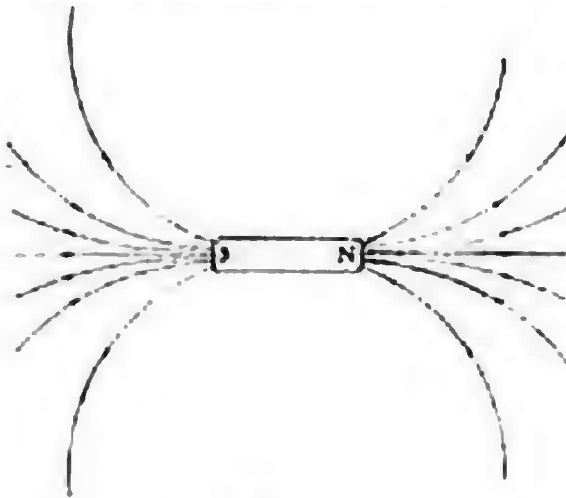


Fig. 4.

PILES ÉLECTRIQUES ET COURANT ÉLECTRIQUE

Un *élément de pile* consiste en deux lames de métaux différents, cuivre et zinc, par exemple, partiellement plongées dans un liquide (fig.5) qui exerce sur elles des actions chimiques inégales. Si, en dehors du liquide, les deux lames sont reliées par un fil métallique (fig.6), le circuit fermé que cons-

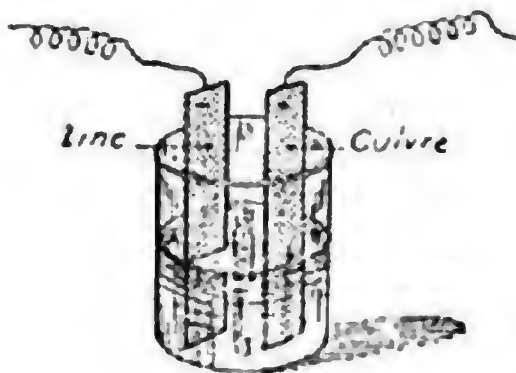


Fig. 5.

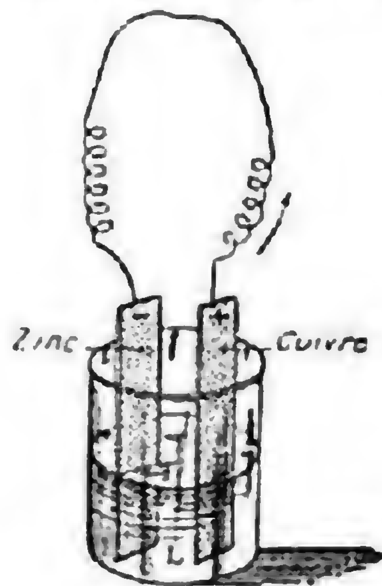


Fig. 6.

tituent la première lame, le fil extérieur, la seconde lame, puis le liquide compris entre les deux lames, devient le siège de phénomènes spéciaux, dits phénomènes de *courant électrique*. Ce nom provient de ce que les effets observés s'énoncent aisément en imaginant dans le circuit fermé une circulation analogue à celle d'un fluide liquide ou gazeux. En suivant le fil extérieur à l'élément, on convient de considérer ce courant spécial comme allant du *pôle* dit *positif*, qui est le métal le moins attaqué chimiquement à l'autre métal, qui est le *pôle négatif*, pour

revenir au pôle positif à travers le liquide. Le courant a circulé à travers une suite ininterrompue de corps dits *bons conducteurs*. Les métaux, l'eau, les solutions de sels métalliques sont des corps bons conducteurs. Des corps dits *isolants*, tels que l'air, les résines, le verre, arrêtent le courant électrique. L'interruption du courant par l'introduction d'un isolant en un point de son circuit fait dire que le circuit est *ouvert*. Dans le circuit *fermé* que parcourt un courant électrique, on admet un transport d'une matière, appelée *électricité*, formée de corpuscules extrêmement petits qui sont poussés par une *force électro-motrice*, de la même façon qu'un liquide est poussé par une pression, dans une conduite qui réunit deux vases où les niveaux sont différents. Une différence de niveau électrique, ou *différence de potentiel*, déterminée par la nature des métaux et du liquide de l'élément, est la cause de la force électro-motrice ou de la *tension*.

Tant que le circuit d'un élément de pile reste *ouvert*, l'élément ne change pas ; il est au contraire modifié dans sa constitution chimique quand un courant électrique vient à parcourir son circuit.

L'observation des effets d'un courant électrique dans le circuit fermé d'un élément de pile a montré que les diverses sections transversales du circuit conducteur sont toutes traversées simultanément par une *même quantité* d'électricité. La quantité d'électricité qui traverse par seconde chaque section est appelée *intensité* du courant. L'intensité du courant est, à chaque instant, proportionnelle à la différence de potentiel des deux pôles ; elle est affaiblie par une *résistance* au transport de l'électricité,

1. Dans l'élément de Volta, le métal positif était du cuivre et le métal négatif était du zinc. Le liquide L était de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique.

qu'oppose chaque portion du circuit. La résistance totale du circuit est la somme des résistances partielles. La résistance d'un conducteur varie avec sa nature ; elle croît avec sa longueur et diminue quand sa section augmente. Le cuivre est le métal usuel le moins résistant ; les liquides de l'élément, tout en étant conducteurs, sont beaucoup plus résistants que les métaux.

L'intensité I se mesure en *ampères*, la force électromotrice ou la différence de potentiel E en *volts*[1], la résistance R en *ohms*. La loi de l'intensité d'un courant *constant*, appelée loi d'Ohm ou loi de Pouillet, a pour expression $I = \frac{E}{R}$.

Pour les applications de l'électricité, il est souvent avantageux de grouper plusieurs éléments. Dans le groupement, dit *en série*, on joint par un court conducteur le pôle négatif d'un premier élément au pôle positif d'un second, puis le pôle négatif du second au pôle positif d'un troisième... Le tout forme une suite d'éléments que l'on nomme d'ordinaire, une *pile*. Le pôle positif du premier élément est le pôle positif de la pile, le pôle négatif du dernier est le pôle négatif de la pile. On ferme le circuit en réunissant les pôles extrêmes par les conducteurs que l'on veut faire traverser par le courant. Pour un élément unique ou pour une pile d'éléments, le sens du courant est le sens du pôle positif au pôle négatif dans la partie extérieure du circuit. Quand une pile est formée de *n* éléments en série, les forces électromotrices des *n* éléments s'ajoutent. Si les éléments ont la même constitution et la même force électromotrice individuelle E, la

1. Les éléments de pile usuels ont une force électromotrice voisine de un volt. Un accumulateur au plomb a une force électromotrice voisine de deux volts.

loi de l'intensité s'écrit : $I = \frac{nE}{R}$; I est l'intensité, R est la somme des résistances opposées par les *n* éléments et par le circuit extérieur.

Un courant électrique exerce dans son propre circuit certaines actions qu'on peut appeler *intérieures*. Les principales actions intérieures sont des réactions chimiques et l'échauffement des conducteurs du circuit. Un courant exerce aussi, en dehors de son circuit, des actions qu'on appelle *extérieures*. Ces actions extérieures sont des effets magnétiques qui sont particulièrement intéressants en télégraphie. Elles ont eu pour point de départ une expérience due au physicien danois Œrsted.

Œrsted, en 1819, découvrit qu'un fil métallique, tendu parallèlement à une aiguille aimantée NS, libre et en repos, la fait dévier quand il vient à être parcouru par un courant électrique (fig.8). On exprime ce fait en disant qu'un courant électrique crée autour de lui, un *champ magnétique*. Dans le champ magnétique créé par un fil que parcourt un courant électrique, les lignes de force sont des circonférences concentriques situées dans des plans perpendiculaires au fil et dont les centres sont sur le fil.

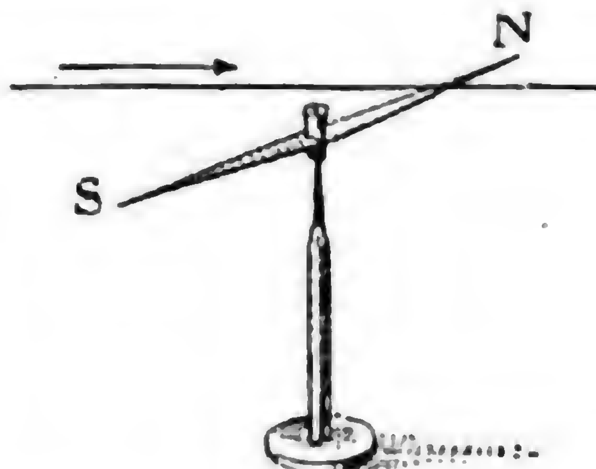


FIG. 8.

Ampère a su obtenir avec les courants des systèmes, appelés *solénoïdes*, qui se comportent comme des aimants. On réalise un solénoïde en faisant circuler un courant

électrique dans des spires de fil conducteur enroulées parallèlement sur un cylindre. S'il est libre de se mouvoir, un solénoïde s'oriente comme un aimant dont l'axe serait l'axe du solénoïde. Une de ses extrémités se dirige vers le nord, l'autre extrémité se dirige vers le sud ; aussi appelle-t-on pôle nord et pôle sud les extrémités d'un solénoïde. Les pôles de même nom de deux solénoïdes se repoussent, comme les pôles de même nom de deux aimants ; les pôles de noms contraires s'attirent.

L'espace qu'entourent les spires d'un solénoïde est traversé par un flux de force magnétique, parallèle à l'axe du solénoïde (fig.9). Chacune des lignes de ce flux se ferme en sortant par le pôle nord pour rentrer par le pôle

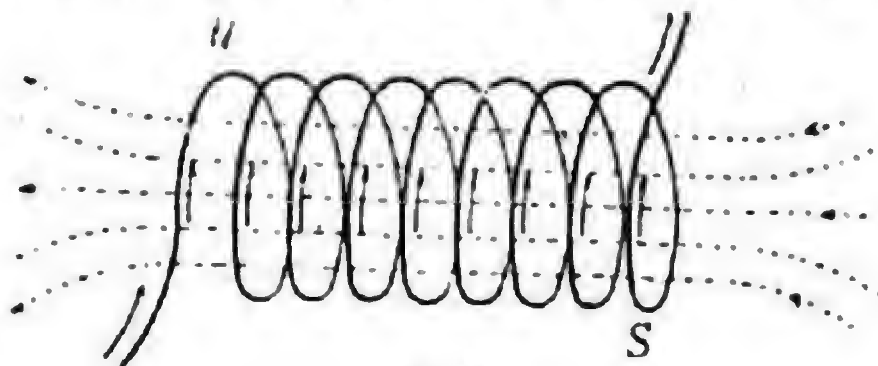


Fig. 9.

sud. Une aiguille aimantée, libre, se dirige suivant une ligne de force, à l'intérieur comme à l'extérieur du solénoïde (fig.10). De la limaille de fer dessine les lignes de force développées par un solénoïde de la même façon que les lignes de force d'un aimant.

Ampère, assimilant, inversement, un aimant quelconque à un solénoïde parcouru par un courant, appelait *courants de l'aimant* les courants d'un solénoïde qui est équivalent à cet aimant.

En poursuivant les conséquences des analogies précédentes, deux règles importantes ont pu être énoncées :

1° un système magnétique, aimant ou courant, mobile dans un champ magnétique, se met en équilibre dans une position telle que son flux propre prenne la direction du flux du champ magnétique. 2° un observateur, qui se place en face d'un pôle sud de solénoïde ou d'aimant, y

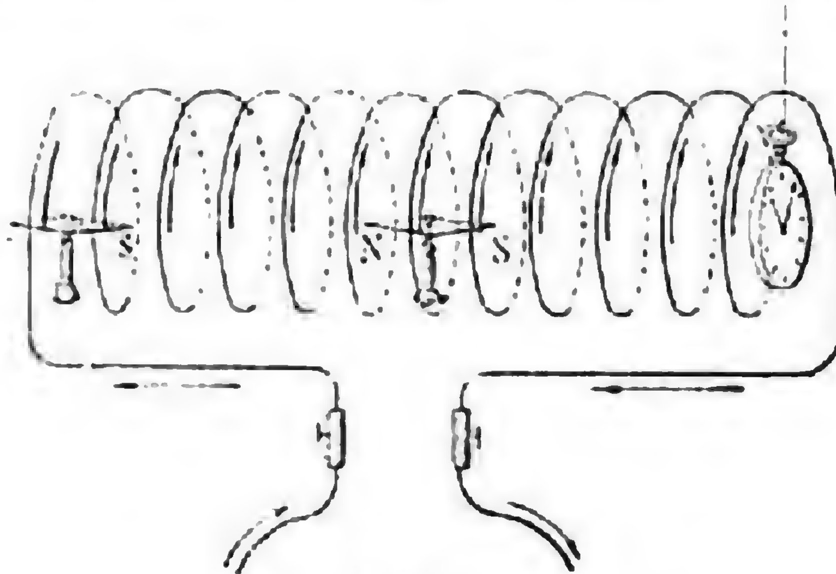


Fig. 10.

voit le courant circuler dans le *sens direct:* de gauche à droite ou sens des aiguilles d'une montre (fig. 10).

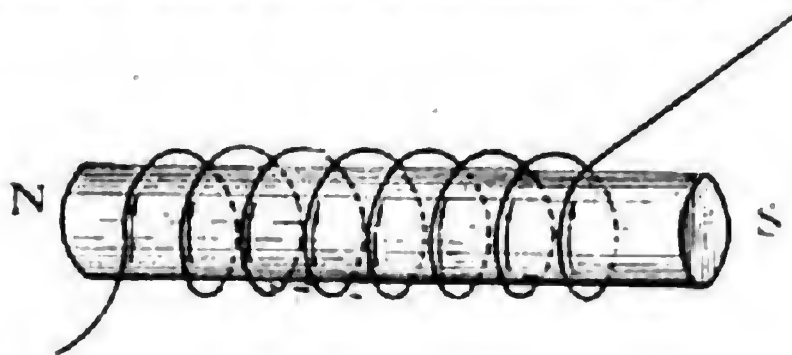


Fig. 11.

Enfin, de même qu'on voit un morceau de fer devenir un aimant *temporaire* dans un champ magnétique, un noyau de fer introduit dans l'axe d'un solénoïde devient un aimant pendant le passage du courant et son flux magné-

tique renforce le flux du solénoïde. L'aimantation de cet aimant, dit *électroaimant* (fig. 11), croît jusqu'à une certaine limite avec l'intensité du courant ; elle cesse complètement avec le courant, si le fer est *doux*, c'est-à-dire pur. Le solénoïde et le noyau aimanté ont un pôle de même nom à la même extrémité. On utilise, dans de très nombreux appareils, l'aimantation temporaire des électroaimants.

Si, autour de l'aiguille d'une boussole et, dans le plan vertical dans lequel elle s'oriente au lieu de l'expérience, on enroule une ou plusieurs spires parallèles de fil conducteur formant un circuit où ne passe aucun courant, l'aiguille reste immobile. Mais quand on dirige un courant de pile dans les spires, l'aiguille est déviée, et elle l'est d'autant plus que le courant est plus intense. Le flux magnétique de l'aimant mobile tend, en effet, à prendre la direction du flux magnétique du courant qui parcourt les spires du cadre fixe. L'ensemble de l'aiguille et du cadre constitue un *galvanomètre* ou un *ampèremètre*.

Souvent, pour la mesure d'un courant électrique, au lieu de dévier une aiguille aimantée mobile par un cadre fixe sur lequel sont enroulées des spires que parcourt un courant, on fait agir un aimant fixe fortement aimanté sur un cadre mobile dont les spires sont parcourues par le courant à mesurer. Le cadre est alors dévié ; le flux magnétique du courant de ses spires tend à prendre la direction du flux magnétique de l'aimant.

Les effets magnétiques ne sont pas les seuls qui servent à comparer les courants ; c'est ainsi que dans l'étude de courants variables on emploie des *ampèremètres thermiques*.

ÉLECTROSTATIQUE

On avait constaté dans l'antiquité que l'*ambre* frotté attire les corps légers, tels que des barbes de plume, des feuilles d'or. On reconnut plus tard que la *résine* et le *verre* frottés possèdent la même propriété. Le corps frotté était dit *électrisé*. Au XVIII[e] siècle, on découvrit que le frottement électrise tous les corps. Sur certains d'entre eux, dits *isolants*, ou *diélectriques*, l'attraction des corps légers n'a lieu que par les points frottés. Sur d'autres, dits *conducteurs*, la propriété attractive se montre sur toute la surface ; elle n'apparaît toutefois que sur un conducteur *isolé*, c'est-à-dire soutenu par un corps isolant. Un corps conducteur, isolé et électrisé, partage sa propriété attractive avec un autre corps conducteur isolé auquel on le réunit, soit par contact direct, soit par l'intermédiaire d'un fil conducteur, mais la propriété attractive diminue à mesure que s'accroît la surface totale ainsi électrisée. Une communication avec le sol, dont la surface est infiniment grande, fait perdre immédiatement son électrisation à tout corps conducteur électrisé.

Le frottement n'est pas le seul procédé d'électrisation. Quel que soit le procédé, les corps dits isolants restent isolants, les conducteurs restent conducteurs, et *deux espèces d'électricité* apparaissent constamment à la fois : l'une, *vitrée* ou *positive*, est celle qui charge un bâton de verre frotté avec de la laine ; l'autre, *résineuse* ou *négative*, se développe sur la résine frottée avec de la

laine. Dans ces frottements, la laine se charge négativement avec le verre, positivement avec la résine.

Deux corps chargés d'une même électricité se repoussent ; ils s'attirent s'ils sont chargés d'électricités contraires.

Deux corps conducteurs, identiques, chargés d'une même électricité, sont dits *également chargés*, si dans les mêmes conditions de position et de distance, chacun d'eux attire avec une force égale, un même corps léger. Deux conducteurs, chargés d'électricités contraires, sont dits *également chargés* par leurs électricités respectives, si, lorsqu'on les met en contact, ils deviennent *neutres*, ou non électrisés, comme le sol du lieu où ils se trouvent.

La pile est une source chimique d'électricité. Son courant convertit, pendant sa circulation, de l'énergie chimique en énergie électrique. Son pôle positif charge d'électricité vitrée ou positive un corps conducteur avec lequel il est mis en communication ; le même corps serait chargé d'électricité négative s'il était relié au pôle négatif. La charge de ce corps conducteur est, dans les deux cas, indépendante des dimensions des éléments de la pile ; elle est proportionnelle à leur nombre, lorsque ces éléments sont tous de même constitution et associés en *série*.

Quand on vient à réunir par un fil métallique les deux pôles d'une pile, les charges de signes contraires des pôles se réunissent par le fil et leur renouvellement continuel fait qu'un courant électrique parcourt constamment la pile elle-même et son circuit.

Avant la découverte de la pile par Volta, les sources d'électricité étaient des *machines à frottement*, par lesquelles de l'*énergie mécanique* était convertie en énergie électrique. Développées en même temps en quantités égales, l'une sur le corps frotté, l'autre sur le corps frottant, les deux

électricités y sont recueillies séparément sur deux corps conducteurs, appelés *pôles*, qui offrent comme les deux pôles d'une pile, une différence de potentiel.

Lorsque, pendant le fonctionnement d'une machine électrique, les deux pôles P et P' (fig. 12) ne sont séparés que par un assez petit intervalle d'air, les électricités contraires en présence, parviennent, en s'attirant, à vaincre la résistance de la couche d'air qui les sépare et une *étincelle* bruyante et lumineuse éclate brusquement. De petites particules métalliques, arrachées par l'étincelle à la matière des pôles, facilitent, à travers l'intervalle d'air, le passage d'un courant *momentané*, de même nature qu'un courant de pile, qui neutralise les pôles en égalisant leurs potentiels électriques. Quand une nouvelle différence de potentiel des deux pôles s'est établie par le fonctionnement ininterrompu de la machine, la résistance de l'intervalle d'air peut être surmontée, comme précédemment, et une nouvelle étincelle éclate. Les décharges successives ainsi obtenues sont des courants électriques intermittents, qui ont un sens constant, car chacun des pôles de la machine garde son signe électrique.

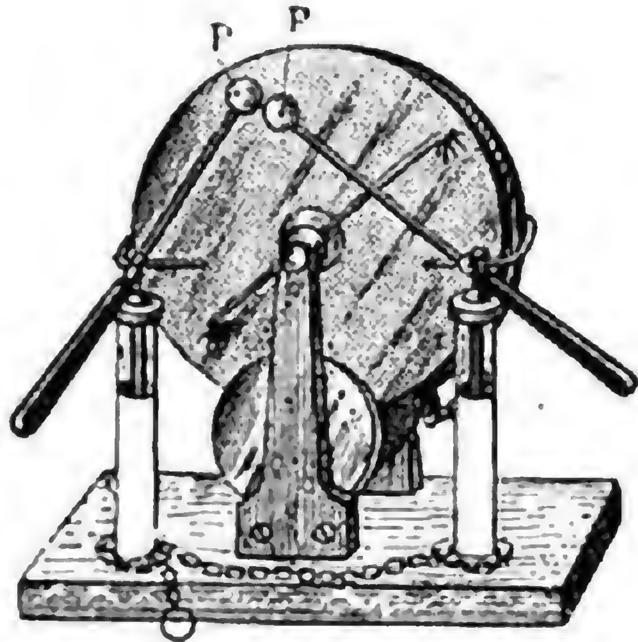


Fig. 12.

La différence de potentiel des deux pôles d'un élément

de pile étant incomparablement plus faible que celle des deux pôles d'une machine électrique, des étincelles n'éclateraient entre les pôles d'une pile que s'ils étaient extrêmement rapprochés et si la pile elle-même comprenait un très grand nombre d'éléments associés en série. Les étincelles se succéderaient alors sans interruption.

On se représente le courant fourni par une pile comme un courant liquide continu, de très faible pente et de puissant débit ; un courant de machine électrostatique est comparable à un filet liquide qui tombe, par saccades, d'une très grande hauteur. L'analogie avec un courant d'eau se poursuit sur le parcours d'un circuit de courant électrique. On sait que la hauteur du niveau du liquide au-dessus du niveau de l'embouchure diminue graduellement sur le cours d'un fleuve, de même le niveau électrique baisse dans le sens du débit sur le trajet d'un courant électrique.

Un réservoir vide, mis en communication avec un point d'un fleuve, se remplit d'une quantité de liquide proportionnelle au niveau du fleuve en ce point et aux dimensions du réservoir. De même, un conducteur, mis en communication avec un point d'un circuit de pile, prend une charge électrique proportionnelle, à la fois, au niveau électrique en ce point et à une grandeur nommée *capacité électrique* du conducteur.

Une source d'électricité sert souvent à charger un *condensateur*. Ce nom est donné à un ensemble de deux surfaces métalliques de même étendue, C et C', parallèles, appelées *armatures*, séparées par une mince couche isolante (fig. 13). Quand on a réuni chacune des armatures d'un condensateur à un des pôles d'une source électrique, elle prend une charge de même signe et de même potentiel que le

pôle auquel elle est réunie. En raison de l'attraction mutuelle des deux électricités contraires en regard, de fortes quantités d'électricité s'accumulent sur les armatures si celles-ci sont très rapprochées. La charge de chacune d'elles se fait par un courant de faible durée qui peut être mesuré à l'aide d'un *galvanomètre*. Quelles que soient les dimensions du condensateur, sa charge est proportionnelle à la différence des potentiels des pôles de la source. La *capacité* d'un condensateur est, par définition, sa charge pour une différence de potentiel des deux pôles de la source égale à un volt ; elle augmente avec la surface des armatures et avec leur rapprochement ; elle dépend aussi de la nature de la lame isolante.

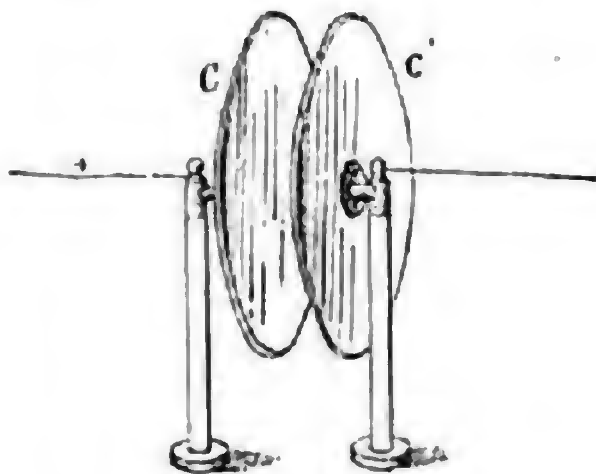
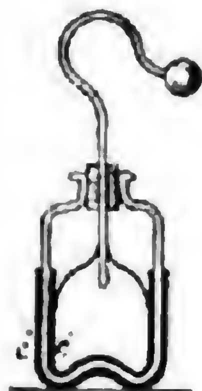


Fig. 13.

Après qu'un condensateur a été chargé, on obtient un courant de décharge des électricités accumulées en réunissant les armatures. Dans le circuit conducteur qui réunit extérieurement les armatures, le courant de décharge est de sens contraire au courant de charge.


Fig. 14.

Quand un condensateur à armatures larges et voisines a été chargé avec une machine électrostatique, source dont les pôles peuvent acquérir une très forte différence de potentiel, les effets calorifiques, lumineux, mécaniques, physiologiques du courant brusque de décharge qui est obtenu deviennent

importants. On les met souvent en évidence avec une *bouteille de Leyde*, condensateur à lame isolante de verre (fig. 14) qui a la forme d'une bouteille. On dirige, dans diverses substances, la décharge d'un condensateur avec un *excitateur*, formé de deux tiges métalliques, montées à charnières et supportées par des pieds isolants. A leurs extrémités voisines, ces tiges sont terminées par des boules ; leurs extrémités opposées sont reliées aux armatures par des chaînes métalliques. Dans les condensateurs *à capacité variable*, les armatures sont formées de lames parallèles C et C', demi circulaires, dont les surfaces sont amenées par rotation à se recouvrir plus ou moins, en restant séparées par l'isolant (fig. 15).

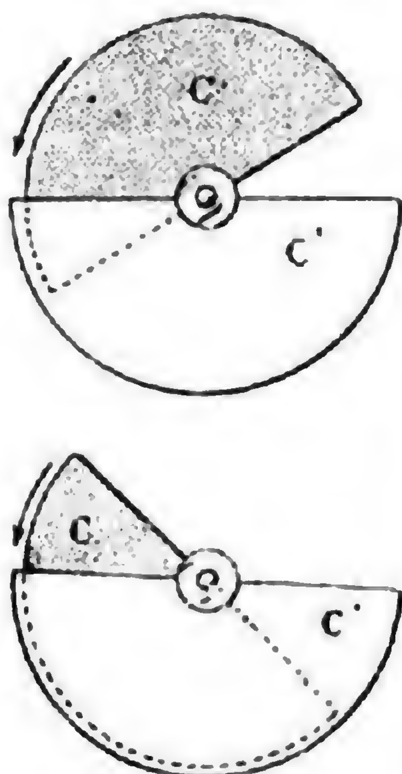


Fig. 15.

Comme l'eau d'un lac en repos à un niveau supérieur au niveau de la mer, une quantité d'électricité en équilibre sur un conducteur possède une *énergie* en puissance, ou *potentielle*, disponible, égale au travail dépensé pour l'élever sur le conducteur à un potentiel supérieur au potentiel du sol. Un condensateur de grande capacité, chargé par une source de haut potentiel tient en réserve une grande quantité d'énergie. Quand, par la décharge du condensateur, cette énergie se transforme, elle produit des effets importants si la décharge est rapide.

INDUCTION

Les courants électriques dont il a été question jusqu'ici étaient *continus*, c'est-à-dire de sens invariable ; mais, avec une même source, pile ou autre, on peut imposer à un courant des intensités et des sens divers. Si, par exemple, le courant d'une pile P suit, dans un fil conducteur, entre une borne A reliée au pôle positif et une borne B reliée au pôle négatif, un chemin ACB, on lui fera suivre le chemin BCA dans le même fil en joignant la borne B au pôle positif et la borne A au pôle négatif. Ces changements de sens ACB, BCA, peuvent être répétés. Les courants *alternatifs*, ainsi obtenus dans un même fil conducteur, auront une durée et un intervalle qu'on fera varier à volonté. Les signes des pôles de la pile restant les mêmes, on conçoit, que, par l'intervention de résistances convenables et de dispositifs inverseurs, on obtienne toutes sortes de courants.

Des courants très variés peuvent souvent prendre naissance dans des fils conducteurs, *sans communication directe avec des sources électriques*, piles ou autres, qui les entretiennent ; ils sont dus à l'influence d'actions magnétiques qu'on exerce à distance en dépensant une *énergie*. Ces courants d'influence ou d'*induction* déterminent, dans un circuit, des effets intérieurs et extérieurs comparables aux effets des courants continus ; toutefois, leur mode de production est différent. Ils ont été découverts en 1832 par Faraday. Dans tout espace

où s'exerce une force magnétique variable, un circuit conducteur devient le siège de courants électriques *induits*. La démonstration de la production de ces courants se fait commodément avec des circuits formés de fils conducteurs enroulés en solénoïdes. On réalise deux sortes d'induction électrique : l'*induction mutuelle* et la *self-induction*.

INDUCTION MUTUELLE

L'induction est dite mutuelle quand elle s'exerce entre deux circuits. Trois exemples vont résumer les phénomènes d'induction mutuelle les plus fréquemment utilisés.

I. Deux solénoïdes, de diamètres inégaux, dont l'un S peut s'engager dans l'autre S', ont été disposés l'un au-dessus de l'autre, leurs axes étant en prolongement. Un courant continu passe d'une façon permanente dans S ; dans le circuit fermé S', où ne passe aucun courant, est intercalé un ampèremètre (fig. 16).

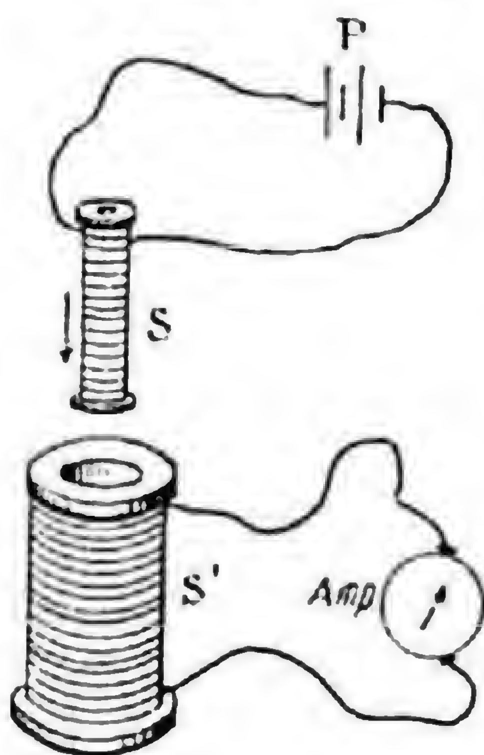


Fig. 16.

Les deux solénoïdes étant immobiles et le courant qui parcourt S restant constant, l'ampèremètre de S' n'accuse aucun courant. Mais toute variation, d'intensité ou de position, du courant

qui passe dans le solénoïde S et qui se comporte comme courant *inducteur*, provoque dans le solénoïde voisin, un courant qui est dit *induit*. Le courant induit est de *même sens* que le courant inducteur quand celui-ci *finit, diminue ou s'éloigne*. Le courant induit est de *sens contraire* au courant inducteur quand celui-ci *commence, grandit ou se rapproche*. Le courant induit dure le même temps que la variation de l'intensité ou de la distance du courant inducteur.

Les effets sont plus faibles, mais semblables, avec deux simples spires en présence, l'une inductrice S, parcourue par le courant continu d'une pile P, l'autre induite S', reliée à un ampéremètre A (fig. 17).

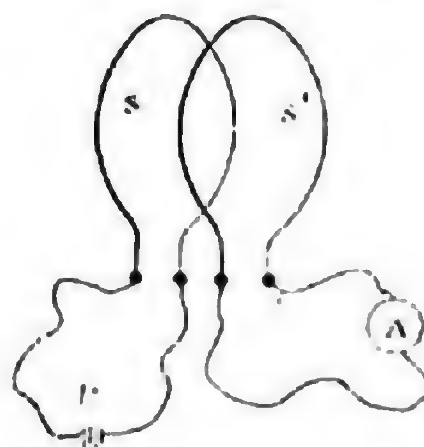


Fig. 17.

On précise le sens d'un courant induit, en disant que le *flux de force auquel le courant induit donne naissance contrarie, à tout instant, la variation du flux magnétique*, qui est dû au système inducteur et qui traverse le circuit induit.

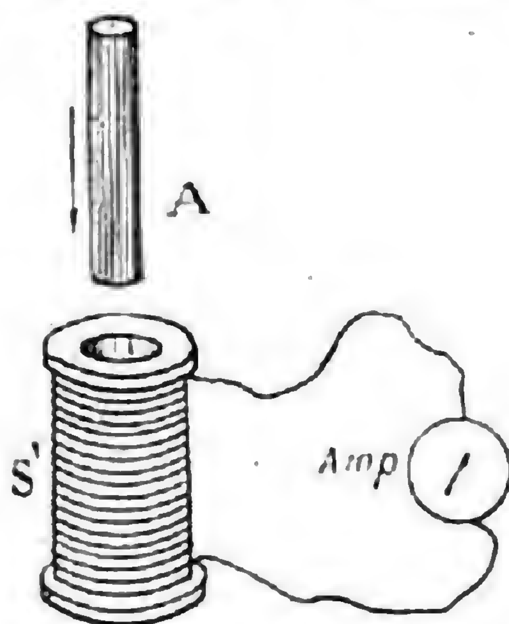


Fig. 18.

II. Au solénoïde inducteur S on substitue un *aimant* A de même axe, pouvant être déplacé suivant cet axe (fig. 18).

Le solénoïdeS', qui joue le rôle d'induit, est immobile,

comme précédemment. Il n'est parcouru par aucun courant, tant que l'aimant reste fixe ; il est parcouru par un courant induit, si l'aimant s'approche, et le courant induit cesse quand l'aimant s'arrête. Un courant induit de sens contraire prend naissance si l'aimant s'éloigne. L'action magnétique du courant induit contrarie le déplacement de l'aimant. Un mouvement de va-et-vient de l'aimant fait naître dans les spires du solénoïde induit une succession de courants alternativement contraires.

III. Aux dispositifs précédents on peut substituer un *électroaimant* qu'on aimante et qu'on désaimante *sans le déplacer*. A cet effet, un noyau de fer doux est recouvert de deux solénoïdes distincts dont les spires sont superposées. Un courant continu qui passe dans l'un des enroulements se comporte comme *magnétisant*. L'autre enroulement devient le siège de courants induits passagers quand on ouvre ou quand on ferme le circuit magnétisant : ils sont de même sens que le courant magnétisant à sa rupture, et de sens contraire à sa fermeture.

Représentation graphique des courants.

La valeur de l'*intensité* d'un courant, à des temps successifs, se représente graphiquement. Sur une ligne horizontale Ot on porte les temps à partir d'une origine en O et, pour chaque valeur $Oa = t$ du temps, on élève, en a, une ordonnée perpendiculaire aA, égale à l'intensité i du courant à cet instant. Un courant continu et constant est alors figuré par une *droite horizontale* parallèle à l'axe des temps.

Si l'intensité varie avec des alternatives d'accroissement

et de diminution, mais conserve le même sens, la courbe est *ondulée* sans couper la ligne horizontale des temps.

Si le sens du courant change, les intensités se comptent au-dessus de l'axe des temps pour un sens et au-dessous pour l'autre sens. Le courant est dit *alternatif* si les changements de sens se répètent régulièrement. Un courant *alternatif périodique* est un courant alternatif pour lequel les changements de sens se reproduisent, après un intervalle de temps constant, appelé *période*.

La figure 19 représente un courant alternatif périodique dont chaque période comprend deux demi-périodes consécutives qui ne diffèrent que par le sens du courant.

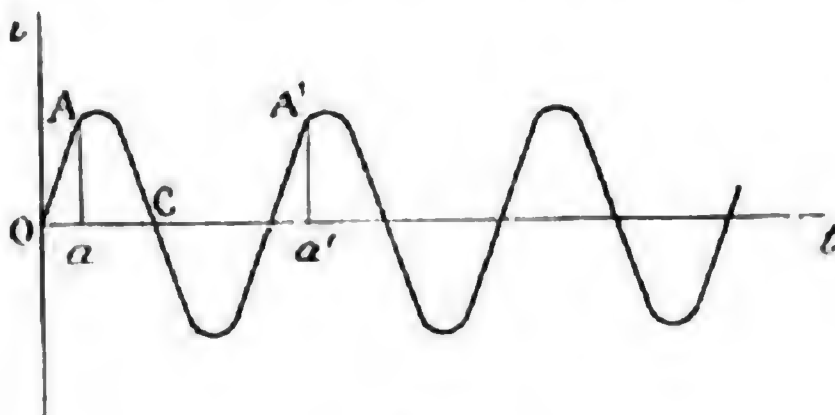


FIG. 19.

L'intensité part de zéro au début d'une période, augmente, atteint un maximum positif, puis décroît jusqu'à redevenir nulle en C ; à ce moment, le courant change de sens, l'intensité augmente jusqu'à un maximum figuré négativement, pour décroître et redevenir nulle à la fin de la période.

Deux valeurs nulles, consécutives, en O et en C, sont distantes d'une demi-période ; deux valeurs égales, telles que A*a* et A'*a'*, de même sens, consécutives, sont dites *dans*

la même phase de leur oscillation ; elles sont distantes d'une période. Une demi-période s'appelle aussi une *alternance*. Il y a, par période, deux *alternances* égales en durée et de sens contraires.

Pour chaque demi-période, on appelle *amplitude* la valeur maximum ou minimum de l'intensité.

Pour un courant alternatif, comme pour tout phénomène périodique, on désigne sous le nom de *fréquence* le nombre de périodes en une seconde (la fréquence correspond à la *hauteur* en Acoustique).

Caractères des courants alternatifs périodiques

Diverses propriétés font reconnaître un courant alternatif. Si on le fait passer dans un ampèremètre magnétique, l'aiguille de l'appareil recevra, pendant la durée de chaque période, deux impulsions successives, l'une à droite, l'autre à gauche de sa position d'équilibre. Si l'aiguille a une masse très petite et si la fréquence n'est pas trop grande, elle exécutera, de part et d'autre de sa position d'équilibre, une série d'oscillations de même période que le courant. Quand la période du courant est notablement plus petite que la durée d'oscillation propre de l'aiguille mobile, celle-ci aura à peine commencé à se déplacer à droite, par exemple, sous l'action d'une impulsion, qu'elle recevra une impulsion en sens contraire ; elle restera alors sensiblement immobile. On n'obtient pas de déviation, quand deux alternances opposées sont égales et se suivent de *trop près* pour que le système mobile, aiguille ou cadre, ait le temps d'obéir séparément à chacune des impulsions contraires. On a une déviation si les

alternances d'un des deux sens sont arrêtées ou affaiblies, ce qui *redresse* au moins partiellement le courant résultant.

L'action calorifique d'un courant étant indépendante de son sens, un circuit reçoit des échauffements qui s'ajoutent pour les deux sens d'un courant alternatif qui le parcourt. Un *ampèremètre thermique* permet de comparer des courants alternatifs soit entre eux, soit avec des courants continus.

Si les sinuosités d'un courant alternatif périodique se reproduisent, de demi-période en demi-période, mais avec une décroissance ininterrompue et plus ou moins rapide des ordonnées de même phase, les amplitudes sont dites *amorties* (fig. 20). C'est le cas du déplacement

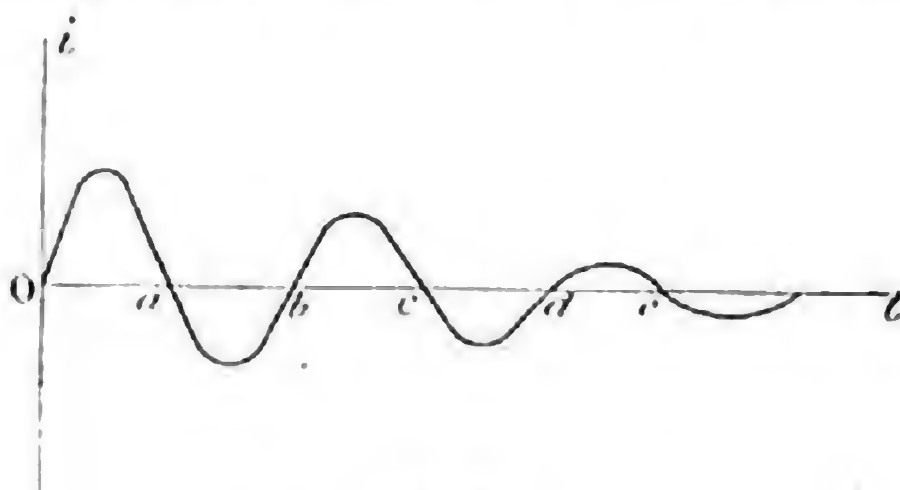


Fig. 20.

oscillatoire d'un corps pesant suspendu, qu'on nomme un *pendule*. Les extrémités des ordonnées qui représentent les écarts du *centre de gravité* d'un pendule déplacé par un choc décrivent une courbe alternative et périodique. Les oscillations sont amorties par les frottements au point de suspension et par la résistance de l'air.

Pratiquement, on distingue deux genres de courants alternatifs périodiques : les courants de *basse fréquence*,

des machines à courants alternatifs ou *alternateurs*, puis les courants de *haute fréquence* pour lesquels la fréquence est grande et dépasse quelquefois des millions.

SELF-INDUCTION

Un courant *variable* n'est pas seulement inducteur pour un circuit voisin, il l'est encore pour son propre circuit. L'induction d'une partie de circuit sur une autre partie du même circuit s'appelle une *self-induction*.

Dans le circuit d'un courant continu, des forces électromotrices de self-induction retardent, à la fermeture du circuit, le courant qui commence. De même, à l'ouverture, des forces électromotrices de self-induction renforcent le courant qui finit.

Les variations ininterrompues d'un courant alternatif font naître à tout instant dans son circuit, une self-induction qui contrarie constamment les deux alternances.

Une partie d'un circuit parcouru par un courant, offre une self-induction plus accentuée si elle est *enroulée en bobine* ; chacune des spires produit, en effet, dans les spires voisines des forces électromotrices de self-induction qui réduisent un courant qui commence et renforcent un courant qui finit. Une partie de circuit qui

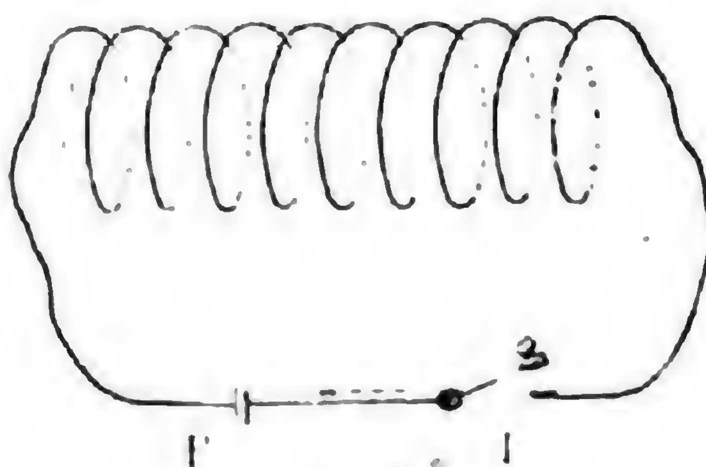


Fig. 21.

offre un enroulement est dite possèder une *grande self-induction*. Par exemple, si l'on ouvre en I, le circuit d'une pile P dont le courant parcourt une spirale (fig. 21) le courant de self induction d'ouverture, en renforçant le courant qui finit, donne une forte étincelle de rupture, alors qu'avec un fil de même longueur *tendu* entre les deux pôles, il n'y a qu'une étincelle imperceptible.

LOI GÉNÉRALE DE L'INDUCTION

La force électromotrice d'un courant induit est *proportionnelle à la grandeur et à la rapidité de la variation du flux magnétique inducteur* que son circuit enveloppe. Si la variation est très rapide, ce qui est le cas de courants inducteurs alternatifs de haute fréquence, les courants induits, eux-mêmes alternatifs, ont aussi une haute fréquence.

Condensateur et self-induction dans un circuit alternatif.

Un condensateur, intercalé sur le trajet d'un courant continu, accumule, sur ses deux faces, des charges électriques égales et contraires. La circulation du courant de charge s'arrête quand la différence de potentiel des deux armatures est égale et opposée à celle des deux pôles de la source. Si le condensateur est placé sur le trajet d'un courant alternatif, le sens de sa charge est continuellement renversé; il parait alors se comporter, par ses charges et ses décharges successives, comme s'il livrait simplement passage au courant alternatif. L'intensité de cette circulation croît avec la surface des armatures.

Quand une spirale d'un grand nombre de tours de fil est introduite dans le circuit d'un courant alternatif de haute fréquence, les courants de self-induction qui y prennent naissance sont, à chaque instant, de sens contraire au courant en circulation et peuvent même l'annuler. Un condensateur placé à la suite de la spirale agit en sens contraire et compense plus ou moins son effet de barrage.

Ces modes opposés d'action d'un condensateur et d'une spirale jouent un très grand rôle dans l'emploi des courants alternatifs ; ils permettent de séparer un courant continu et un courant alternatif de haute fréquence qui ont parcouru, simultanément, un même fil B. Au delà, vient une bifurcation d'où partent : une branche avec un condensateur C, et une branche avec une spirale S (fig. 22). Le condensateur livre passage au seul courant alternatif, le courant continu parcourt seul la spirale. Les deux courants peuvent, après la bifurcation, se réunir en B', puis suivre un même fil.

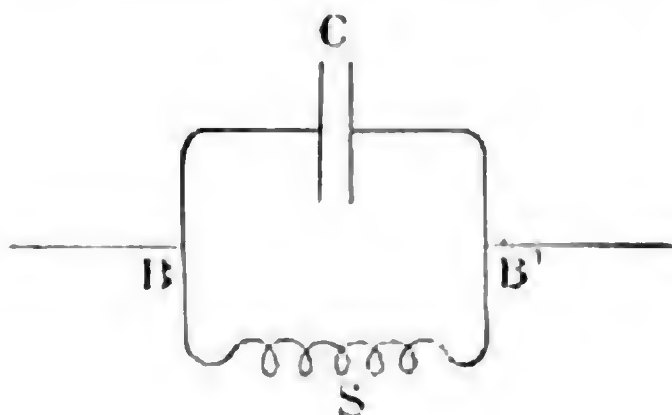


FIG. 22.

L'exemple précédent se rapporte à une très haute fréquence. En général, la spirale offre une résistance d'autant plus grande que la fréquence est plus élevée ; c'est alors que le condensateur présente la moindre résistance.

APPAREILS USUELS.

Un rappel de quelques appareils d'usage courant dans les deux télégraphies, avec fil de ligne et sans fil de ligne, simplifiera les descriptions futures. Une vue sommaire du fonctionnement d'une sonnerie électrique, d'un téléphone, d'une bobine d'induction, de la télégraphie, de la téléphonie, de la commande d'un effet quelconque par fil de ligne, enfin de la télégraphie optique, servira d'introduction, logique et historique, à la radiotélégraphie.

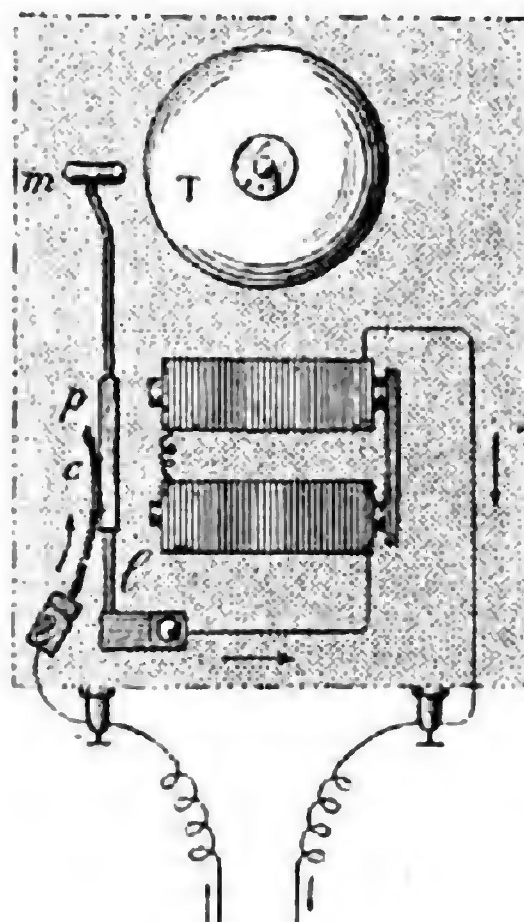


Fig. 23

SONNERIE ÉLECTRIQUE

La sonnerie électrique est une application directe de l'*aimantation intermittente* d'un électro-aimant. Le circuit des fils conducteurs d'une sonnerie comprend une pile et un électro-aimant. Au passage du courant de la pile dans la

bobine magnétisante de l'électroaimant de la sonnerie, le noyau qui s'aimante ouvre le circuit magnétisant en attirant une palette *p* de fer doux (fig. 23). Le circuit étant ouvert, l'électroaimant n'agit plus. Ramenée par l'élasticité de la lame *l* qui la porte, la palette de fer doux rétablit par son contact en *c* la fermeture du circuit magnétisant. Une réaimantation du noyau renouvelle l'ouverture du circuit. Les aimantations et les désaimantations du noyau se succèdent automatiquement à intervalles égaux. En général, en même temps que la palette mobile est attirée par le noyau qui s'aimante, un marteau *m* que porte cette palette frappe contre un timbre T.

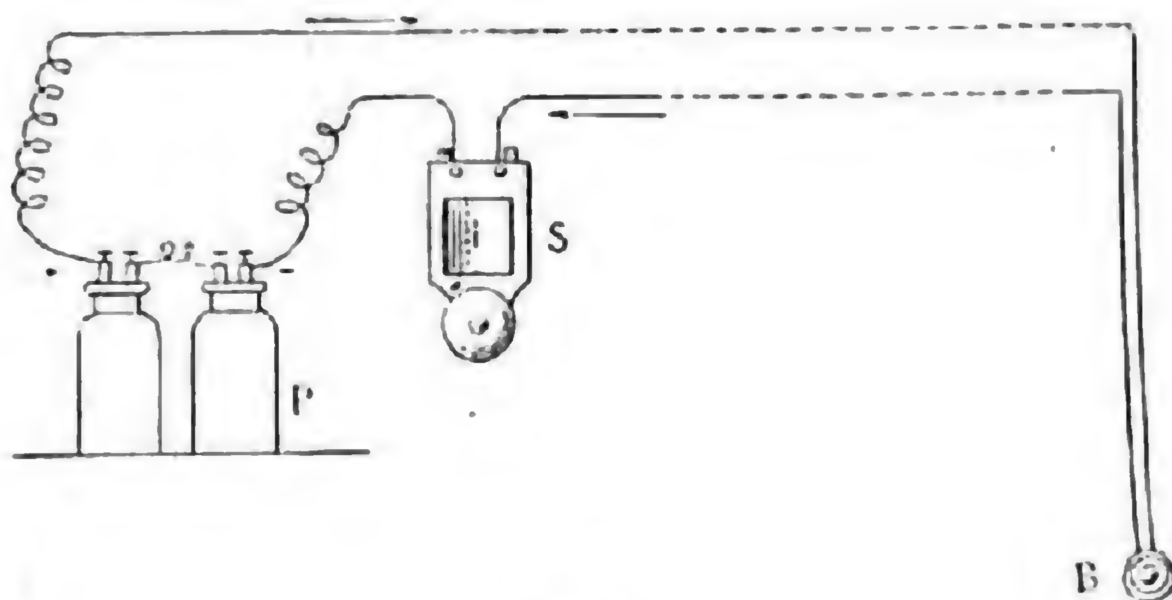


Fig. 24.

Pour l'usage habituel d'une sonnerie S dans un appartement, le circuit de la pile P et de l'électroaimant interrupteur se prolonge jusqu'à un point B d'appel (fig. 24) plus ou moins éloigné. Là, les bouts libres *a* et *c* d'un fil coupé, *mn*, dégagés de leur gaîne isolante, sont serrés l'un contre

l'autre quand on pousse un bouton (fig.25). ; ils ferment alors le circuit magnétisant de l'électroaimant. La sonnerie se fait entendre tant qu'est maintenue en B la pression du doigt contre le bouton.

Une sonnerie électrique pourrait au besoin servir à établir une correspondance par des combinaisons de signaux de durées différentes.

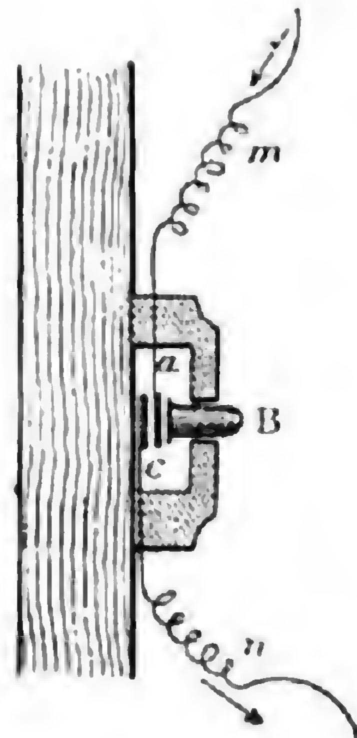


Fig. 25.

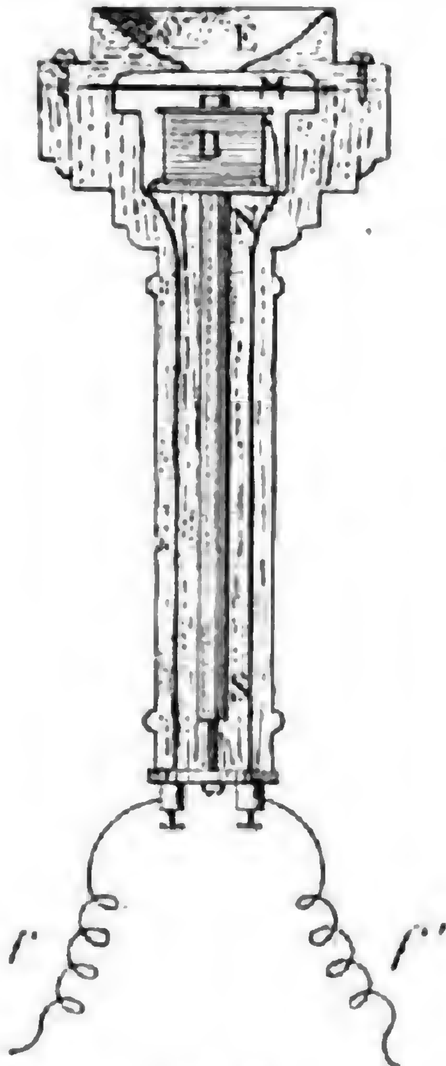


Fig. 26.

TÉLÉPHONE

Un *téléphone* est un appareil électromagnétique qui est le plus souvent employé pour faire entendre la parole à distance. Sous sa forme la plus simple, il consiste en un aimant entouré à l'un de ses pôles N par une bobine B à nombreuses spires de fil isolé. En face et tout près de ce pôle, une mince *membrane de tôle* M, encastrée par ses bords dans une gaîne, occupe le fond d'un cornet E

qu'on peut appliquer à l'oreille. Les extrémités du fil de la bobine se prolongent par deux fils conducteurs f et f' (fig. 26) qui peuvent être reliés aux deux pôles d'un élément de pile. Si le circuit de la pile vient à être fermé, un accroissement de l'aimantation de l'aimant détermine une attraction de la membrane du téléphone ; cette attraction est accompagnée d'un claquement ; un autre claquement a lieu lorsque la membrane reprend sa position primitive à l'ouverture du circuit.

Lorsque le téléphone est employé pour la *transmission de la parole*, il fait partie d'un circuit fermé qui comprend, en même temps, une pile et un microphone. Le microphone est installé au poste où l'on parle, qui est éloigné du poste d'écoute où se trouve le téléphone. Le circuit de la pile restant fermé, la membrane du téléphone est plus ou moins attirée par le pôle à l'occasion des variations d'intensité que le microphone fait naître dans le courant qui circule autour de l'aimant.

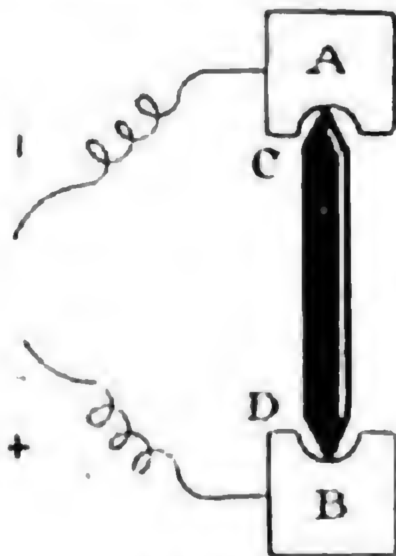


Fig. 27.

Un *microphone* est un assemblage de contacts solides, assez mobiles pour que de très faibles déplacements modifient, en même temps que leur contiguïté, la résistance qu'ils opposent au passage d'un courant électrique (fig. 27). Quand on parle devant le microphone, le courant qui le traverse éprouve des variations d'intensité dont la forme correspond aux modulations de la voix. Ces variations, transmises au

téléphone par le fil de ligne, font vibrer la membrane du téléphone à l'unisson des vibrations sonores.[1] Le courant de la ligne redevient constant et le téléphone silencieux, dès qu'on cesse de parler devant le microphone. Quelle que soit la complexité des opérations de transmission, le téléphone reproduit tous les caractères de la parole émise devant un bon microphone.

Quand le fil qui entoure l'aimant d'un téléphone, au lieu d'être parcouru par un courant *continu*, comme dans l'usage ordinaire, est parcouru par un *courant alternatif* à oscillations entretenues d'amplitude et de fréquence constantes, plusieurs cas se présentent.

Si la fréquence n'est pas trop élevée, les alternatives d'attraction et de retour font vibrer la membrane du téléphone pendant le passage du courant et l'oreille entend un son d'une hauteur égale à la fréquence du courant.

En cas de fréquence très élevée, *l'inertie de la membrane* la maintient immobile dans les alternatives, car elle ne peut répondre séparément à une attraction et à une répulsion qui se suivent de trop près. Mais lorsque les oscillations de haute fréquence sont plus ou moins *redressées*, l'effet *résultant* du courant alternatif est celui d'un courant continu et la membrane reste attirée d'une façon permanente jusqu'à la fin du passage du courant. Si les oscillations de cette même fréquence élevée forment des groupes séparés auxquels on donne le nom de *trains*,

1. Le microphone généralement employé est formé par une plaque mince en charbon qui repose sur des grains de charbon logés dans des alvéoles creusées dans un disque épais de charbon. Lorsque la plaque mince vibre sous l'action de la parole, les variations de ses contacts avec les grains entraînent des modifications de résistance au passage du courant qui correspondent aux modulations de la voix. On dit que le microphone *module* le courant.

2. Quand on parle devant le microphone, la ligne horizontale des intensités du courant est remplacée par une *courbe microphonique* ondulée.

avec repos entre deux trains consécutifs, le téléphone reste silencieux quand les oscillations alternatives de ces trains ne sont pas redressées, mais si elles sont redressées, un claquement se fait entendre à chaque train comme pour un courant continu de même durée que le train, pourvu que les trains ne se succèdent pas eux-mêmes trop rapidement. Quand la fréquence des trains est uniforme, la membrane vibre, avec la note de cette fréquence pour les oscillations redressées.

Un téléphone qui reçoit des trains séparés d'oscillations ne sert plus à reproduire la parole ; il ne s'agit alors que de réception de signaux.

BOBINE D'INDUCTION

Une bobine d'induction[1] est formée d'un noyau de fer doux sur lequel sont enroulés deux fils recouverts chacun d'une gaine isolante, constituant, l'un un circuit inducteur et l'autre un circuit induit. Le circuit inducteur ou *primaire* est un gros fil de cuivre d'un petit nombre de spires, qui entoure directement le noyau ; on y fait passer le courant d'une pile P qu'un interrupteur ouvre et ferme périodiquement en *i*. L'interrupteur peut être automatique et fonctionner comme dans une sonnerie à palette tremblante. Le circuit induit ou *secondaire*, superposé au circuit primaire, est séparé de lui par un tube isolant en ébonite ; il est formé par un très grand nombre de spires d'un fil très fin, parallèles aux spires inductrices. L'addition des forces électromotrices qui sont induites dans les

1. La figure 39 (page 79) présente une bobine d'induction servant à produire les étincelles d'un éclateur dans un poste d'émission de télégraphie sans fil.

nombreuses spires du circuit secondaire donne une force électromotrice totale très élevée.

A la fermeture aussi bien qu'à l'ouverture d'un courant inducteur, une même quantité d'électricité est mise en circulation par induction dans le fil induit ; mais comme, en raison d'effets de self-induction, un courant est notablement plus lent à s'établir qu'à finir, la force électromotrice qui est induite à la fermeture du courant inducteur est très inférieure à la force électromotrice induite à l'ouverture. L'expérience a montré que la force électromotrice induite d'ouverture est encore renforcée quand on introduit en dérivation, de part et d'autre de l'interruption automatique qui a lieu en *i*, les armatures d'un condensateur C, de capacité convenable.

Dans ces conditions, si les extrémités libres du fil secondaire de la bobine sont convenablement écartées, il n'y a pas d'étincelle aux fermetures du circuit primaire, mais une étincelle éclate entre les boules d'un éclateur (fig. 39), en E, à chaque ouverture.

Les étincelles de la bobine d'induction ne livrent alors passage qu'aux courants induits d'ouverture, et, comme ces courants induits du circuit secondaire ont le même sens que le courant continu du circuit primaire, les bornes de l'éclateur ont un signe constant pour les courants qu'elles laissent passer ; elles sont ainsi, pratiquement, semblables aux pôles d'une machine électrostatique. On peut donc parler d'un pôle positif et d'un pôle négatif aux bornes de l'éclateur d'une bobine d'induction. Une bobine d'induction a facilement un plus grand débit qu'une machine électrostatique ; avec un interrupteur rapide, ses étincelles se succèdent à des intervalles très courts,

TRANSFORMATEURS

Une bobine à deux enroulements isolés, l'un F à gros fil ayant peu de spires, l'autre *f* à fil fin d'un grand nombre de spires, s'appelle un *transformateur* si on dirige un courant alternatif dans un des fils (fig. 28).

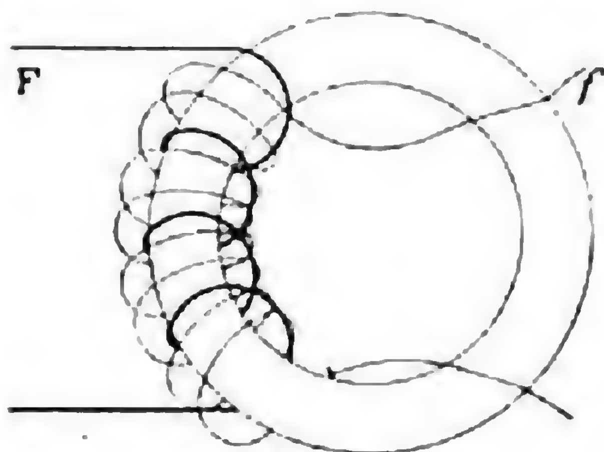


Fig. 28.

Par ses variations, le courant inducteur alternatif fait naître dans l'autre fil un courant qui est encore alternatif. L'alternatif induit est maximum quand l'alternatif inducteur passe par sa valeur nulle, ou par sa vitesse de variation maximum. L'alternatif induit est nul quand l'alternatif inducteur passe par sa valeur maximum ou par sa vitesse de variation nulle.

Si, dans le gros fil F, on fait passer un alternatif de grande intensité et de faible tension, l'intensité induite dans le fil fin *f* est réduite par la résistance du fil, mais la somme des tensions des nombreuses spires du fil fin est fort élevée. Inversement, en dirigeant dans le fil fin un alternatif de faible intensité et de grande tension, on recueille à la sortie du gros fil un alternatif de grande intensité et de faible tension[1].

1. Ces deux transformations inverses sont, en particulier, utilisées pour le transport d'un courant alternatif à grande distance par un cable de section suffisamment réduite. A la station de départ, un premier transformateur réduit l'intensité du courant et élève sa tension ; à la station d'arrivée, un second transformateur abaisse la tension et relève l'intensité.

Le même circuit sera dans un transformateur, tour à tour, inducteur ou induit. Dans la bobine d'induction, le gros fil est toujours inducteur. Un transformateur n'a ni interrupteur ni pièce mobile ; son emploi n'exige aucune surveillance. Il a un noyau de fer ou n'en pas.

Dans l'association des deux spirales d'un transformateur une seule reçoit directement un courant, l'énergie de ce courant passe dans l'autre en proportion d'autant plus grande que leur induction mutuelle est plus active ou que leur *couplage* inductif est plus *serré*. L'énergie *transformée* qui passe dans la spirale induite, décroit à mesure que les enroulements en présence s'écartent davantage l'un de l'autre. Leur couplage est alors dit *lâche*.

TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE AVEC FIL DE LIGNE

Le circuit d'un télégraphe ordinaire pourrait être constitué, comme celui d'une sonnerie par une pile, un double fil de ligne, un électroaimant et un bouton d'appel. Le bouton est au poste d'émission, l'électroaimant au poste de réception. La pile doit comprendre, entre stations éloignées, un nombre notable d'éléments, car l'accroissement de la distance rendant considérable la résistance du fil de ligne, il faut élever la force électromotrice pour que l'aimantation de l'électroaimant reste suffisante.

Une simplification importante a pu être introduite en télégraphie. Entre le bouton d'appel et l'électroaimant, il suffit d'*un fil unique*. A chacun des deux postes, le fil

se termine par une large plaque métallique plongée dans le sol. En jouant le rôle de conducteur entre les deux plaques extrêmes, la terre remplace le second fil (fig. 29).

Au bouton de fermeture de la sonnerie on a substitué un levier M nommé *manipulateur*, que l'on abaisse à la

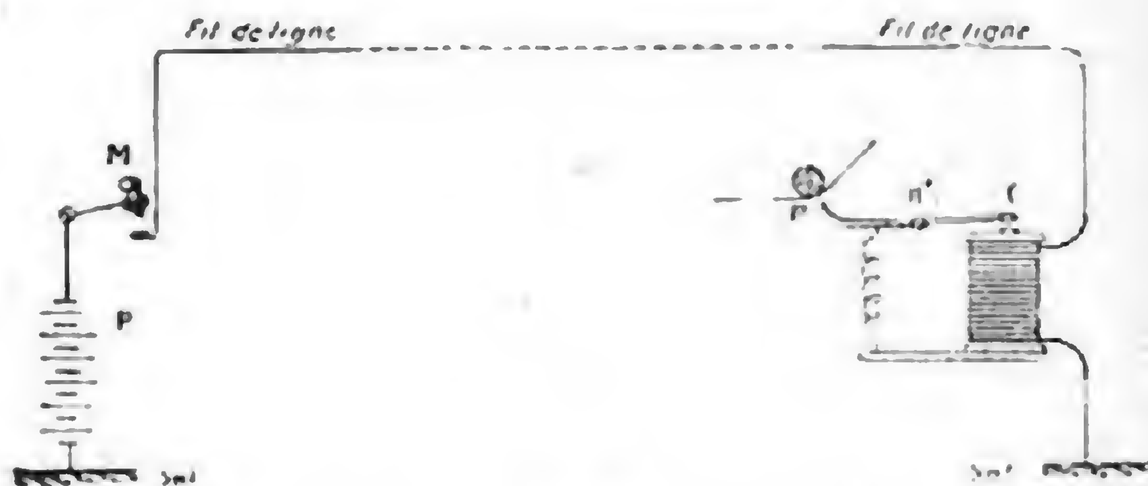


Fig. 29.

main pour mettre en contact deux pièces métalliques qui ferment momentanément le circuit de la ligne. Abandonné à lui-même, le manipulateur se relève par l'effort d'un ressort antagoniste.

L'électroaimant à palette qui sert de récepteur ne ferme plus et n'ouvre plus automatiquement, comme pour une sonnerie, le circuit de la ligne. Le courant ne passe plus par la palette ; entrant par une des extrémités du fil de l'électroaimant et sortant par l'autre, il n'est ouvert et fermé que par le manipulateur.

Le jeu du manipulateur peut commander *une inscription de la dépêche*. A cet effet, la palette de l'électroaimant porte un crayon dont la pointe *p*, soulevée quand le courant passe dans le fil de l'électroaimant, appuie contre un ruban de papier que déroule un mouvement d'horlo-

gerie. Pour une fermeture brève du manipulateur le crayon fait un très court tracé, appelé *point* ; un tracé plus long, dû à une fermeture plus longue, est un *trait*.

Un alphabet spécial, dit *alphabet Morse*, presque universellement adopté, où chaque lettre est conventionnellement représentée par une combinaison de *points* et de *traits* (fig. 30), permet l'expédition textuelle de toute dépêche. Un trait a sensiblement la longueur de trois points. Deux signaux consécutifs d'une lettre sont distants d'un intervalle égal à un point, deux lettres d'un mot sont séparées par un intervalle égal à un trait ; l'intervalle est plus long entre deux mots.

Afin de restreindre les frais d'installation, le fil de ligne n'a qu'une faible section ; il en résulte que, pour de grandes distances, la résistance du circuit augmente considérablement ; alors l'attraction de la palette par l'électroaimant n'appuie plus assez la pointe du crayon contre le ruban de papier. Dans ce cas, au poste de réception, à l'électroaimant inscripteur ordinaire, dans le circuit du fil de ligne, on substitue un autre appareil électromagnétique, appelé *relais*, dont l'équipage mobile obéit à un courant beaucoup plus faible que la palette de l'électroaimant. Lors de la fermeture du circuit de la ligne par le manipulateur, ce relais ferme un circuit auxiliaire, qui est distinct du circuit de la ligne et dans lequel intervient une nouvelle source d'électricité.

Dans ce circuit local du poste de réception, où les fils conducteurs sont courts, a été placé l'électroaimant inscripteur ; il y est animé par une pile qui donne un courant plus intense que le courant de la ligne[1].

1. L'emploi du relais conduit à une amplification de l'effet commandé grâce à l'intervention de l'énergie de la source locale d'électricité.

SIGNAUX MORSE

Lettres

a	. —
b	— . . .
c	— . — .
d	— . .
e	.
f	. . — .
g	— — .
h	. . . .
i	. .
j	. — — —
k	— . —
l	. — . .
m	— —
n	— .
o	— — —
p	. — — .
q	— — . —
r	. — .
s	. . .
t	—
u	. . —
v	. . . —
w	. — —
x	— . . —
y	— . — —
z	— — . .

Chiffres

1	. — — — —
2	. . — — —
3	. . . — —
4	. . . . —
5	. . . . .
6	— . . . .
7	— — . . .
8	— — — . .
9	— — — — .
0	— — — — —

Signal d'appel

. — . — . — . —

Signal de détresse
(en télégraphie sans fil)

. . . — — — . . .

Tant que dure la fermeture de la ligne principale par le manipulateur d'émission, l'équipage mobile du relais maintient fermé le circuit local et l'électro-aimant inscripteur reste animé. Un point ou un trait est encore ici tracé suivant la durée de la fermeture du manipulateur.

Au poste de réception, le relais pourrait être remplacé par un simple téléphone qu'un lecteur au son appliquerait à son oreille. Si le jeu de la membrane du téléphone ne permet pas de distinguer un bref passage du courant d'un passage un peu plus long, une seule fermeture brève du manipulateur produirait un choc au téléphone pour un point, tandis que trois ou quatre fermetures brèves *très rapprochées* détermineraient une impression correspondant à un trait.

Une réception de signaux au téléphone n'est pas qualifiée une téléphonie ; ce nom est réservé exclusivement à une transmission de la parole.

TÉLÉGRAPHIE MULTIPLE. Afin d'augmenter le rendement d'une ligne télégraphique on emploie plusieurs transmetteurs qui envoient, dans un même intervalle de temps, plusieurs dépêches parcourant la même ligne d'une façon indépendante.

Dans le cas de six dépêches simultanées, par exemple, il y a en fonctionnement six appareils émetteurs et six appareils récepteurs. A chaque station se trouve un disque divisé en six secteurs égaux distincts. Deux secteurs de même numéro d'ordre dans les deux disques sont reliés par le fil télégraphique pendant un sixième de tour, l'un à un émetteur à touches, l'autre à un récepteur correspondant. A cet effet, les deux extrémités de la ligne aboutissent chacune à un bras de contact. Les

bras de contact des deux extrémités tournent synchroniquement et passent en même temps sur deux secteurs de même numéro. C'est à ces passages simultanés que se font pour une même dépêche l'expédition et la réception.

Dans cette télégraphie multiple les signaux qui parcourent le fil de ligne sont *successifs*, les signaux de deux dépêches ne sont à aucun moment superposés.

TÉLÉPHONIE

Le circuit d'une ligne téléphonique comprend, comme le circuit d'une ligne télégraphique, une *pile*, un *transmetteur* et un *récepteur*. Le transmetteur est un *microphone* devant lequel on parle ; il remplace le manipulateur du télégraphe. Le récepteur est un téléphone. L'intensité du courant continu qui circule dans le fil de ligne varie d'après les *modulations* de la voix. Il ne convient pas qu'une ligne téléphonique n'ait qu'un fil unique, comme une ligne télégraphique, et que la terre remplace le second fil. Il lui faut deux fils, un pour l'aller et l'autre pour le retour et ces deux fils doivent être assez voisins pour ne comprendre entre eux qu'une surface très petite et n'entourer ainsi que le plus faible flux magnétique possible. La ligne téléphonique se trouve alors protégée contre des courants d'induction dus à des phénomènes électro-magnétiques extérieurs. Au poste de réception, un correspondant, prévenu par une sonnerie, applique contre son oreille le téléphone dont le fil fait partie du circuit de la ligne, il entend et reconnaît la parole. La conversation se poursuit directement entre les deux interlocuteurs.

Téléphonie par courants alternatifs. — On peut reproduire la parole en utilisant, pour courant de transmission sur la ligne téléphonique, un courant alternatif régulièrement entretenu. On parle devant un microphone disposé à la station d'émission entre la source du courant alternatif et l'entrée du fil de ligne. Par ses variations de résistance sous l'influence de la voix, le microphone agit sur les amplitudes de chacune des alternances du courant alternatif (fig. 65) comme il agirait sur les amplitudes de courants continus successifs de très courte durée. Le courant alternatif *modulé* qui suit dès lors le fil de ligne est dit *porteur* de la modulation. Si ce courant, qui vient ensuite agir sur le téléphone à la station de réception a été plus ou moins *redressé*, le téléphone reproduit la parole émise avec tous ses caractères.

Il a été reconnu que plusieurs courants alternatifs distincts de *hautes fréquences* différentes, conservent leur indépendance[1] en suivant un même fil conducteur si leurs fréquences ne sont pas trop voisines. Chacun d'eux peut porter une transmission téléphonique spéciale. Dû à une source particulière, il a été modulé sur les deux alternances du courant de cette source par un microphone qui lui était spécialement affecté. Les divers courants séparément modulés parcourent ensemble, sans s'influencer, le fil de ligne commun. A la sortie de ce fil de ligne, des associations convenablement choisies de spirales de self induction et de condensateurs séparent les différents courants porteurs de modulations. Après cela, les modulations des divers courants micro-

1. Tandis qu'un courant continu se comporte comme s'il traversait uniformément les divers éléments d'une section transversale d'un fil de ligne, un courant alternatif de haute fréquence se localise dans des parties de la section du fil qui sont d'autant plus voisines de la surface extérieure que sa fréquence est plus élevée.

phoniques qui avaient été superposées aux courants porteurs de hautes fréquences sont reçues séparément après redressement par des téléphones distincts [1].

TÉLÉMÉCANIQUE PAR FIL CONDUCTEUR

A de courtes distances, de simples moyens mécaniques assurent diverses commandes. Ces moyens ne suffisent plus quand la distance augmente. Des fluides sous pression sont utilisés dans certains cas, mais c'est à l'électricité qu'on a le plus souvent recours.

Un courant continu permet d'effectuer, à distance, des effets variés, au moyen d'un manipulateur qui est installé à un poste de commande. Le poste de commande et le poste d'exécution, qui peuvent être très éloignés l'un de l'autre ou séparés par des obstacles infranchissables, sont reliés par un fil de ligne. Le circuit comprend un manipulateur, une pile et un électroaimant. L'agencement des appareils à faire fonctionner est réglé, à l'avance, dans tous les détails, au poste d'exécution, de manière qu'aucun opérateur n'ait besoin d'intervenir, pendant la réalisation des effets commandés.

La palette d'un électroaimant ou la pièce mobile d'un relais, ferme au gré du manipulateur du poste de commande, par bascule ou par rotation, un circuit spécial localisé au poste d'exécution. Le courant de ce dernier circuit, une fois déclanché, se maintient s'il est entretenu sur place par une source convenable d'énergie qui

1. Le fil de ligne commun que suivent ici plusieurs courants alternatifs de haute fréquence peut être parcouru en même temps par un courant continu porteur d'une transmission microphonique indépendante.

fait partie du poste ; les effets commandés par le faible courant d'une simple pile, agissant par le fil de ligne sur le relais seront rendus localement aussi puissants et aussi prolongés qu'on le voudra. En émettant des courants successifs qui varient par leur durée respective et par leurs intervalles, le poste de commande déclanche tel ou tel organe récepteur. Avec une préparation bien étudiée, les effets produits sont suspendus, repris, modifiés à des instants dont on reste maître.

Il a été commode dans certains cas d'utiliser des courants alternatifs de périodes différentes suivant simultanément un même fil de ligne et s'adressant à des récepteurs qui correspondent à leurs périodes respectives.

TÉLÉGRAPHIE OPTIQUE

La télégraphie aérienne de Chappe était une télégraphie optique. Dans certains cas, de puissants phares ont été utilisés pour l'expédition de dépêches proprement dites. Au langage de Chappe où les signaux représentaient de courtes phrases, l'alphabet Morse était substitué par la manœuvre d'un écran devant le feu lumineux. Un éclair isolé figurait un point, trois ou quatre éclairs très rapprochés équivalaient à un trait. La transmission s'opère en tous sens ou elle est limitée à une seule direction, pour une plus grande portée, au moyen d'un miroir parabolique ou d'une lentille. La dépêche est reçue par l'œil d'un observateur ; elle peut aussi être enregistrée par un appareil photographique.

L'usage de radiations particulièrement choisies ou de rayons polarisés a rendu, au besoin, les messages invisibles à ceux qui n'étaient pas armés d'un récepteur approprié. La télégraphie optique a pu être employée entre des stations éloignées de 200 kilomètres.

A la fin du XIXe siècle, les services de la guerre avaient établi, dans le sud de l'Algérie, sur des points culminants, des postes optiques qui se succédaient à des distances de 40 à 120 kilomètres. Les projecteurs lumineux étaient installés dans des fortins entourés d'une enceinte.

Différentes conditions atmosphériques qui sont fréquentes dans certaines régions ou des obstacles interposés suspendent toute communication optique. D'ailleurs, même en mer, si grande que soit la hauteur d'un poste d'émission, la courbure de la terre apporte vite une limite de distance infranchissable.

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

La télégraphie avec fil de ligne est une télégraphie par *conduction* où un courant électrique circule de l'une à l'autre des deux stations en correspondance. Le courant actif ne s'écarte pas du fil conducteur de liaison.

On conçoit une télégraphie par *induction*, dans laquelle un courant inducteur, circulant dans un circuit localisé à un poste d'émission, agirait, à distance, sur un circuit induit distinct, localisé à un poste de réception, sans liaison matérielle entre les deux circuits. Un courant électrique étant brusquement produit dans le circuit inducteur d'émission, un courant induit correspondant prendrait naissance au poste de réception, où il agirait momentanément sur un indicateur de courant. Plusieurs postes récepteurs pourraient être influencés au même instant par le poste d'émission. C'est une application des phénomènes généraux observés dans l'étude de l'induction électrique.

Les systèmes de circuits qui se sont, dès le début de l'étude des phénomènes d'induction, le plus efficacement prêtés à la production de courants induits, à distance, ont été des solénoïdes avec ou sans noyaux de fer. Un solénoïde inducteur, à courants interrompus, agit sur un

solénoïde induit de même axe. (fig. 16) Une fermeture ou une ouverture d'un courant inducteur, effectuée brusquement à l'aide d'un manipulateur, peut ainsi donner naissance à un courant induit, correspondant, de très courte durée.

Mais, que le courant inducteur fût alternatif ou continu, il fallait d'après les faits expérimentalement observés, pour qu'il y eût une action appréciable, que la distance du système inducteur au système induit demeurât très faible ; aussi, aucune production d'effets commandés, *à distance, sans fil*, n'avait été envisagée.

Les courants alternatifs inducteurs, d'abord employés, avaient été des courants alternatifs de basse fréquence, ou de très longue période. Or, d'après la loi fondamentale de l'induction, une force électromotrice induite est proportionnelle à la *vitesse de variation* du flux magnétique inducteur enveloppé par le circuit induit.

L'Américain Henry et l'Italien Matteucci avaient observé que des décharges de bouteilles de Leyde, accompagnées d'étincelles, donnaient lieu à des courants d'induction plus vifs que ceux qu'on observait d'ordinaire ; il était naturel d'attribuer cette puissance d'induction à la courte durée des décharges de ces condensateurs.

Sous sa première forme, la télégraphie sans fil de ligne a été une télégraphie par induction où les courants inducteurs étaient des courants de décharges de condensateur accompagnées d'étincelles. L'histoire des débuts de cette télégraphie est liée à l'étude des étincelles électriques de décharges de condensateurs.

NATURE D'UNE ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE

Les éclatements lumineux de la foudre ressemblent aux étincelles de décharges de condensateurs, mais leur soudaineté et leurs dangers ne permettaient guère leur examen. Ce n'est que depuis le XVIIIe siècle, époque à laquelle des décharges de bouteilles de Leyde furent obtenues, puis souvent répétées, pour reproduire leurs effets, que l'étincelle électrique fut étudiée. Pendant longtempts cependant, on ne sut d'elle que ce que nos sens nous montrent : qu'elle est sonore, lumineuse et chaude. Sa durée avait aussi été trouvée fort courte.

EXPÉRIENCE DE FEDDERSEN

Vers 1860, Feddersen donna, pour la première fois, une démonstration expérimentale précise et incontestable du caractère *oscillatoire* du courant électrique de décharge d'un condensateur. Il faisait réfléchir sur un miroir tournant M, une étincelle E de décharge de condensateur. L'étincelle était verticale et éclatait dans l'air (fig. 31). L'axe de rotation OO' du miroir tournant M était vertical comme le miroir. L'image de l'étincelle, reçue sur un écran P, était également verticale, et la rotation du miroir la faisait s'étaler horizontalement, perpendiculairement au trait lumineux. Reçue sur une plaque photographique et développée, cette image, au lieu de former une traînée

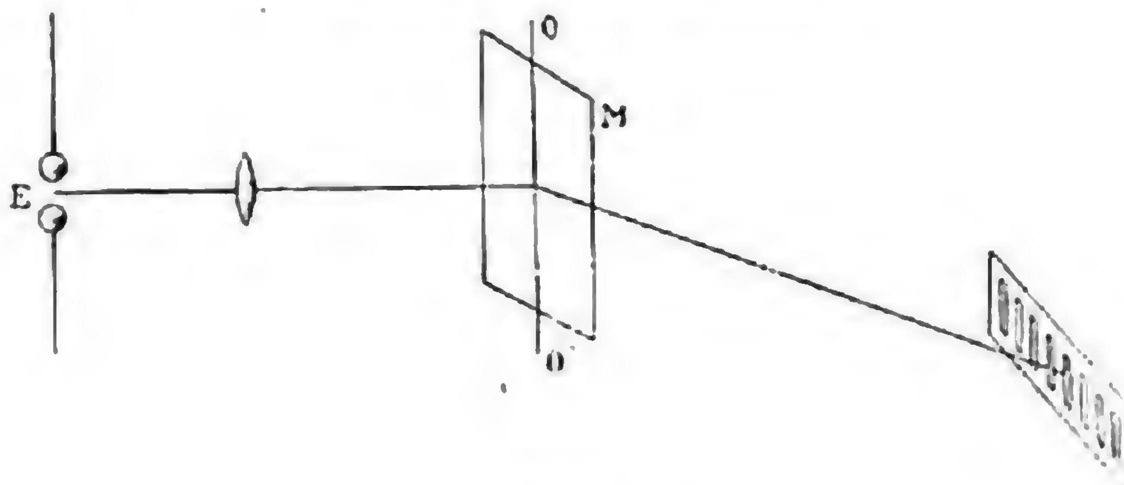


Fig. 31.

lumineuse continue, offrait sur sa longueur plusieurs bandes lumineuses, verticales, équidistantes, séparées par des bandes obscures. Il y avait eu plusieurs décharges, donnant lieu à des étincelles distinctes que la persistance des impressions sur l'œil faisait voir superposées, quand on n'avait pas recours au miroir tournant. La photographie indiquait, d'après l'aspect des bandes, que les étincelles partaient tour à tour, de l'une puis de l'autre, des boules de l'éclateur. Les courants de décharge changeaient donc alternativement de sens et, comme les bandes lumineuses, ils diminuaient rapidement d'intensité.

La vitesse de rotation du miroir étant connue, la longueur occupée sur la photographie par l'ensemble de l'image d'une étincelle permet de calculer la durée totale de la décharge ; cette durée n'est qu'une très petite fraction de seconde. Comme le courant de l'étincelle change alternativement de sens, en passant par une valeur nulle à des intervalles de temps égaux, il a le caractère des courants alternatifs périodiques. La photographie pouvait permettre de mesurer la durée de la période.

Feddersen avait constaté expérimentalement que cette période augmente avec la capacité et avec la self-induction du circuit de décharge. Le *circuit de décharge* est l'ensemble que forment, avec les armatures du condensateur, les fils qui vont aux deux boules de l'éclateur et l'intervalle gazeux que parcourt l'étincelle.

La décharge totale cesse d'être oscillante si la résistance de son circuit devient considérable. Par réflexion sur le miroir, l'image de l'étincelle prend alors la forme d'une traînée lumineuse unique, allongée dans le sens de la rotation du miroir. Le courant de décharge va, dans ce cas, en augmentant jusqu'à un maximum, puis il diminue progressivement jusqu'à devenir nul.

Quand le circuit de décharge est assez peu résistant, ce qui arrive pendant l'étincelle, quand il est formé de gros conducteurs métalliques, celle des deux armatures, qui était primitivement positive, devient négative après une première décharge, puis elle redevient positive après la seconde et ainsi de suite. Les oscillations sont dues à des effets de self-induction dans le circuit. Les variations du flux magnétique que le contour du circuit enveloppe pendant la décharge, sont extrêmement rapides et les forces électromotrices d'induction qui prennent naissance peuvent atteindre des milliers de volts.

EXPÉRIENCES DE HERTZ

En 1887, Hertz, en diminuant considérablement la capacité et la self-induction du circuit de décharge d'un condensateur, obtint des fréquences notablement plus élevées que celles de Feddersen. Son appareil avait l'aspect de

l'excitateur qu'on employait depuis longtemps pour montrer les effets des bouteilles de Leyde. Il se composait de deux tiges de laiton, de longueur égale, en prolongement l'une de l'autre et séparées par un faible intervalle d'air AB (fig. 32). De part et d'autre de cet inter-

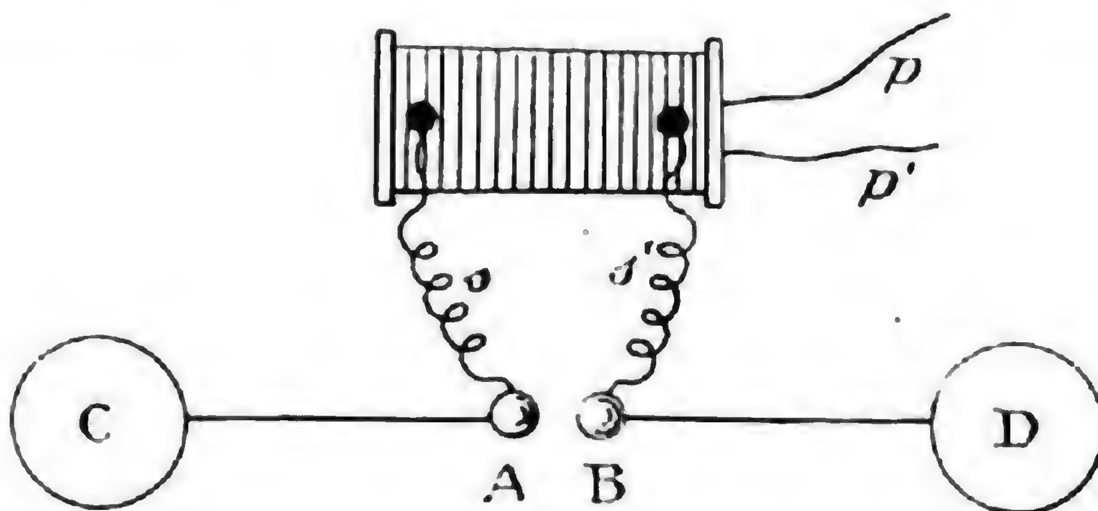


Fig. 32.

valle, chaque tige était limitée par une petite boule. Les extrémités opposées des deux tiges étaient ici terminées chacune par une plus grosse boule, en C et D. Chargées d'électricités contraires, les deux branches de l'excitateur sont comparables aux armatures d'un condensateur dont les capacités principales sont les deux grosses boules ; la couche isolante est l'intervalle d'air AB.

On relie les deux branches aux extrémités *s* et *s'* du fil secondaire d'une bobine d'induction. Au moment où le circuit du fil primaire *pp'* de la bobine a été *ouvert* par son interrupteur automatique, les deux conducteurs AC et BD prennent une différence de potentiel qui est celle des extrémités du fil secondaire *ss'* et qui augmente jusqu'au moment où une étincelle éclate entre A et B. En raison

de l'échauffement de l'intervalle d'air et de l'entraînement de particules métalliques arrachées aux boules de l'éclateur, la résistance de l'étincelle est très faible. La décharge est indépendante du fil secondaire, dont la self-induction oppose une résistance absolue à toute dérivation d'un courant de haute fréquence. La grande résistance de l'intervalle d'air AB se rétablit après l'étincelle.

A chaque ouverture du circuit primaire de la bobine d'induction, l'éclateur de l'excitateur donne une étincelle.

On savait qu'un courant alternatif de décharge produit des effets d'induction dans les conducteurs voisins.

Hertz fit voir que la propagation de ces effets a lieu par un *rayonnement vibratoire électromagnétique*, qui est comparable à un rayonnement vibratoire lumineux et dont la fréquence est celle du courant alternatif de la décharge électrique elle-même.

Hertz eût difficilement mesuré cette haute fréquence N avec un miroir tournant, car elle dépassait dix millions et la décomposition d'une décharge ne s'obtient convenablement pour une fréquence d'un million qu'avec une rotation du miroir d'environ 500 tours par seconde. Il calculait, d'après une expression théorique, la période de vibration T en fonction des trois constantes électriques du circuit de décharge, qui sont sa résistance R, sa capacité C et sa self-induction L. Dans les expériences de Hertz, où la résistance R était négligeable pendant l'étincelle, cette période s'exprimait simplement par

$$T = 2\pi \sqrt{CL}.$$

En cas de rayonnement et d'une propagation uniforme de ce rayonnement, il est légitime, en admettant qu'un milieu de transmission prend lui-même part aux alternances

de la source rayonnante, d'appliquer les équations qui conviennent à la propagation d'un mouvement vibratoire lumineux et à la propagation d'un mouvement vibratoire sonore :

$$NT = 1, \quad V = N\lambda,$$

où N est la fréquence, T la période, V la vitesse de propagation, λ la longueur d'ondulation, c'est-à-dire l'espace parcouru par le mouvement vibratoire dans son milieu de propagation, pendant la durée T d'une vibration. Le célèbre physicien anglais Maxwell avait admis que la vitesse de propagation de vibrations électriques dans l'air ou dans le vide devait être la même que pour la lumière, ou 3.10^{10} centimètres par seconde. Ayant calculé T d'après les valeurs de C et de L qui se rapportaient à son excitateur, Hertz pouvait introduire N, qui est l'inverse de T, dans l'équation $3.10^{10} = N\lambda$ et obtenir la longueur d'ondulation λ pour un mouvement vibratoire électrique de fréquence N.

La valeur de λ ainsi obtenue était de l'ordre de grandeur d'une longueur d'ondulation sonore : elle se prêtait à la reproduction, dans un laboratoire, d'une expérience d'interférence électrique ,semblable à celle que Savart avait autrefois faite pour étudier l'*interférence d'une onde sonore directe et d'une onde sonore réfléchie* contre un mur. Quand le mouvement vibratoire sonore réfléchi, de retour à la source, était en concordance avec le mouvement vibratoire direct, l'intervalle de la source au mur était subdivisé en parties égales par des *noeuds* et des *ventres* fixes de vibration, la surface réfléchissante étant un nœud et la source un ventre. La distance d'un nœud à un ventre consécutif est le quart de la longueur d'ondulation des vibrations de la source.

Faite dans les mêmes conditions par Hertz pour une vibration électrique issue de son excitateur, en prenant comme surface réfléchissante un plan métallique, cette expérience fit connaître directement la longueur d'ondulation λ, par la mesure d'une distance entre un nœud et un ventre, c'est-à-dire entre un minimum stationnaire de mouvement vibratoire et le maximum stationnaire consécutif. La longueur d'ondulation λ, relative à la fréquence connue N, était ainsi trouvée expérimentalement, indépendamment de la connaissance de la vitesse V. La valeur de V était alors calculée d'après l'équation $V = N\lambda$, sans faire intervenir l'hypothèse de Maxwell. La valeur exacte de V fut obtenue ensuite par une autre détermination, directe et précise, due à Blondlot ; elle est égale à la vitesse de propagation de la lumière.

D'après ces expériences, on peut affirmer que, dans un milieu qui est identique en toute direction, un rayonnement électrique, issu d'un point, se propage avec la vitesse d'un rayonnement lumineux. A un instant donné, il offre des *mouvements vibratoires* qui sont concordants sur une sphère qui a le point pour centre. Cette sphère est une surface d'onde. Des sphères consécutives, de même centre, sont aussi des surfaces d'onde. Deux surfaces d'onde, issues d'une même source, sur lesquelles les mouvements vibratoires sont au même instant concordants, ou comme on dit, dans une même phase de leur vibration, sont distantes d'un nombre entier de longueurs d'ondulation. Une propagation par ondes électriques n'est pas un courant électrique, mais elle fait naître un courant électrique dans un corps conducteur.

L'égalité des vitesses de propagation pour le rayonne-

ment lumineux et pour le rayonnement électrique conduit à admettre un même milieu de propagation pour les deux genres de vibrations. Le milieu qui transmet les vibrations électriques est donc le milieu cosmique impondérable, appelé *éther*, à la fois élastique et résistant, auquel on attribue la propriété de transmettre la lumière en vibrant lui-même.

Il est dès lors naturel de considérer les vibrations électriques et les vibrations lumineuses comme des *vibrations de l'éther*, qui ne diffèrent que par la période. Une confirmation est la communauté de propriétés qu'on observe pour les deux sortes de vibrations. En se propageant dans différents milieux, elles éprouvent des modifications semblables, suivant des lois qui s'énoncent de la même manière, par *réflexion*, *réfraction*, *diffraction* et *polarisation*.

Les corps sur lesquels les *vibrations électriques* se réfléchissent sont les corps *bons conducteurs* et, en particulier, les métaux. Pour les vibrations électriques, il y a aussi des corps *transparents* et des corps *opaques* ; les corps transparents sont les corps isolants ou diélectriques tels que l'air, le verre, l'ébonite, l'essence de térébenthine.

Les longueurs d'onde étant beaucoup plus grandes pour les rayons électriques que pour les rayons lumineux, la répétition, avec les rayons électriques des expériences usuelles de réflexion et de réfraction de la lumière, exigerait des miroirs et des lentilles de dimensions tellement grandes que leur construction serait irréalisable. Il en est ainsi déjà pour les longueurs d'onde de la plupart des expériences de Hertz.

En ce qui concerne la diffraction, la grande longueur d'onde des rayons électriques leur permet, comme aux rayons sonores, de contourner aisément les obstacles.

Comme les vibrations lumineuses, les vibrations électriques se superposent, en se propageant, sans se déformer.

CLASSEMENT DES VIBRATIONS DE L'ÉTHER

Si l'on classe les vibrations de l'éther par *ordre de fréquence*, en allant des plus rapides aux plus lentes, on voit leurs propriétés varier progressivement. Les diverses vibrations de l'éther que l'on rencontre, forment trois groupes dont les radiations s'échelonnent sur environ 50 octaves (d'après le langage de l'acoustique), la fréquence doublant d'une octave à la suivante. En partant de la fréquence la plus grande, le premier groupe est celui des rayons X ; le second, auquel appartiennent les rayons lumineux, s'étend des rayons ultra-violets les plus réfrangibles aux rayons calorifiques les moins réfrangibles ; le troisième est celui des rayons électriques.

Le *premier groupe* comprend des rayons dits *pénétrants*, qui traversent dans une certaine mesure les corps opaques ; leur pouvoir de pénétration diminue en même temps que leur fréquence. En tête, avec la fréquence la plus grande ou la longueur d'onde la plus courte, se placent les rayons γ du radium, puis les rayons X *durs* et enfin les rayons X *mous*, moins pénétrants que les durs. Dans les rayons de la plus haute fréquence des rayons mous, la longueur d'onde est au moins dix mille fois plus petite que la longueur d'onde $0^{\mu}.1$ d'une radiation ultra-violette, qui précède la partie visible du spectre lumineux[1].

1. Le *micron* μ représente un millième de millimètre. $0^{mm}.3$ valent 300 μ.

Au *second groupe* appartient la région lumineuse du spectre solaire, qui s'étend seulement de la longueur d'onde $0^{\mu},35$ à la longueur d'onde $0^{\mu},8$. Aux deux extrémités de la région lumineuse, se trouvent, du côté le plus réfrangible, les radiations ultra-violettes et, de l'autre côté, les radiations infra-rouges. On peut prendre, pour point de départ du groupe, la longueur d'onde $0^{\mu},1$ d'une radiation ultra-violette ; on passe par $0^{\mu},6$ pour une radiation voisine du vert et on va jusqu'à $0^{mm},3$ pour la radiation calorifique la plus réfrangible qu'on ait observée. A $0^{\mu},1$ correspond la fréquence trois millions de milliards d'après l'équation $3.10^{10} = N\lambda$; pour $0^{mm},3$ elle tombe à mille milliards.

Le *troisième groupe* est celui des *radiations électriques*. Pour une longueur d'onde de 3 millimètres, la fréquence est cent milliards. Une des étincelles de l'excitateur de Hertz, convenable pour répéter l'expérience de l'interférence d'une vibration électrique directe et d'une vibration électrique réfléchie contre un mur, avait une longueur d'onde de 3 mètres, et une fréquence de cent millions. Une des étincelles des expériences de Feddersen, avait une longueur d'onde de 300 mètres et une fréquence de un million ; cette longueur d'onde de 300 mètres convient à un petit poste de télégraphie sans fil. Avec une longueur d'onde de 30 kilomètres, la fréquence est dix mille.

ORIGINE DE LA RADIOTÉLÉGRAPHIE

Les expériences de Hertz ont eu un grand retentissement ; elles confirmaient l'existence d'un rayonnement électrique, prévu par Maxwell et semblable au rayonnement lumineux. Il se propage comme lui par ondes, empruntant pour sa propagation le même milieu cosmique. Ces expériences n'apportaient, elles-mêmes, rien qui parût susceptible de faire jouer à ce rayonnement un rôle utilisable à distance dans sa propagation. Les radiations électriques qui auraient semblé, à ce point de vue, particulièrement efficaces, auraient été celles qui développent *les plus grandes forces électromotrices* d'induction, c'est-à-dire celles dont la période est la plus courte et qu'on appelle plus spécialement radiations hertziennes. Or, d'après l'expression de leur période,

$$T = 2\pi \sqrt{CL},$$

elles proviennent de sources de très petite capacité, et l'énergie qu'elles portent est très faible. A quelles distances aurait pu agir la lumière si les sources de lumière n'avaient eu qu'une intensité insignifiante ?

Les expériences de Hertz n'étaient donc pas de nature à suggérer des applications lointaines du rayonnement électrique, aucun récepteur *connu* n'eût été assez sensible ; il faut chercher ailleurs l'origine des essais d'une radiotélégraphie dont l'idée ne venait à personne.

L'étincelle des décharges électriques ordinaires, qui avait, à la fin du XVIIIe siècle, suscité les expériences de

Dalibard et de Franklin, qui avait conduit Feddersen, puis Hertz à des résultats spéciaux d'une importance exceptionnelle, allait encore, sous sa forme ordinaire, jouer un rôle précurseur.

RADIOCONDUCTEURS

La première télégraphie électrique sans fil fut une télégraphie par étincelles. Elle eut pour origine des recherches qui furent présentées à l'Académie des Sciences en 1890

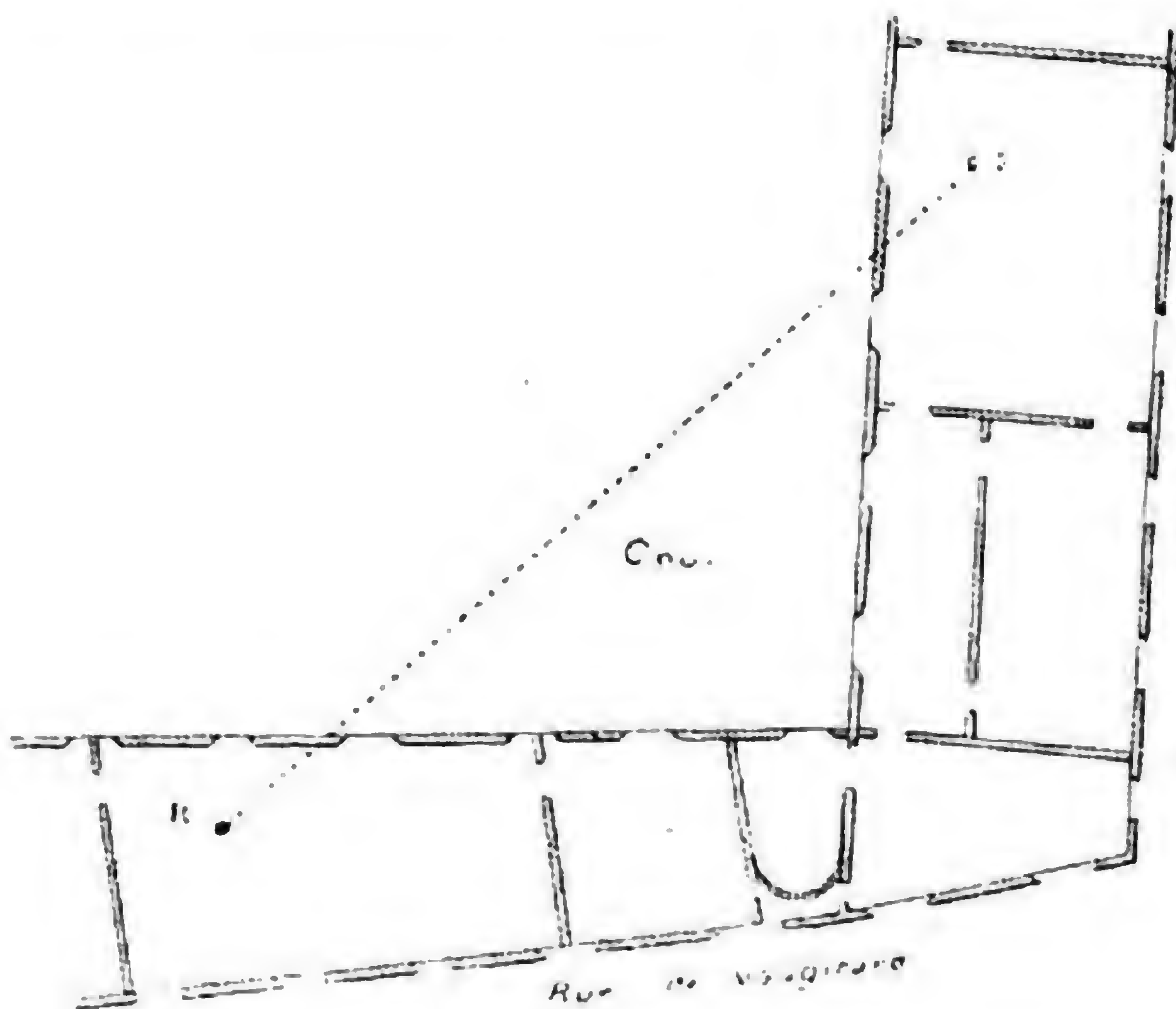


Fig. 33.

et 1891, et qui signalaient la *fermeture à distance d'un circuit* de pile sous l'influence rayonnante d'une étincelle de décharge de condensateur.

Dès sa première communication, l'auteur, M. Branly, décrit explicitement une expérience qui offre à la fois un fait nouveau de conductibilité électrique à distance et son utilisation pratique.

Dans une salle de cours, (fig. 33) se trouve, en E, un éclateur à étincelles dont les boules sont les pôles d'une machine électrostatique de Wimshurst, munie de son condensateur (fig. 12). Dans une salle éloignée de la salle de cours et séparée d'elle par trois grandes pièces, est installé, en R, un petit circuit (fig. 34) formé par un

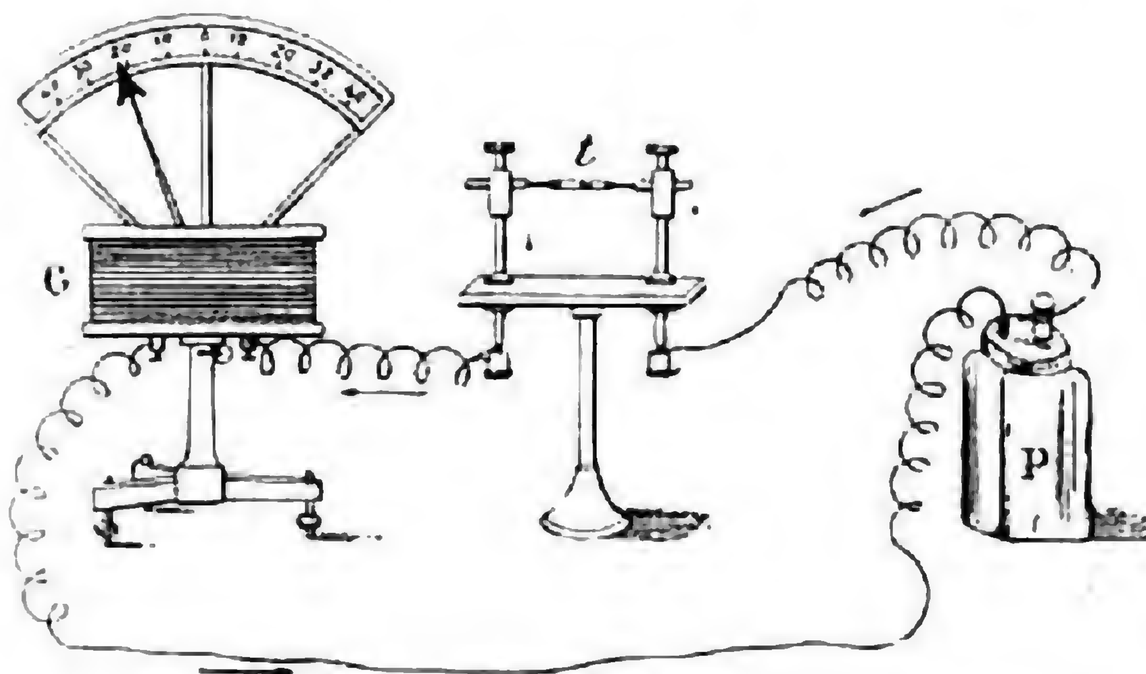


Fig. 34.

élément Daniell P, un *galvanomètre* G et un tube de verre étroit *t*, contenant un peu de limaille métallique intercalée entre deux tiges conductrices *aa'* et *bb'* (fig. 35). La ligne droite ER, qui va de l'éclateur

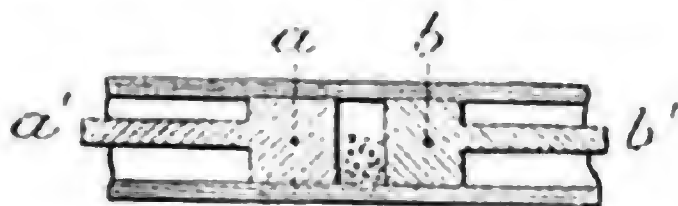


Fig. 35.

au circuit de pile, a une longueur d'au moins 25 mètres, elle traverse deux murs que sépare une cour. On peut dire que l'éclateur se trouve à un poste d'émission et le tube à limaille à un poste de réception. Il n'y a aucune liaison matérielle entre les deux postes. Le circuit étant fermé en R, aucun courant n'y circule et l'aiguille mobile du galvanomètre reste au zéro de la graduation. Si, à un moment donné, une étincelle est produite à l'éclateur, la limaille devient instantanément conductrice et le galvanomètre accuse une déviation qui indique le passage d'un courant. Un très léger choc sur le tube à limaille ou sur son support supprime le courant, une nouvelle étincelle entre les pôles de l'éclateur le rétablit. Ces alternatives se succèdent à la volonté de l'opérateur.

L'auteur changea successivement la nature de la limaille, la grosseur de ses grains, la substance isolante qui sépare les grains, le métal des pistons conducteurs, leur pression. Il opéra aussi avec un *contact unique* de deux substances conductrices choisies, dont il fit varier encore les conditions. La modification apportée à la résistance au moment de la production d'une étincelle de décharge de condensateur, fut avec le plus grand nombre des substances en contact, une *diminution*.

Souvent les étincelles de l'éclateur de la machine de Wimshurst étaient remplacées par celles d'un éclateur alimenté par le fil secondaire d'une petite bobine d'induction. Les appareils sensibles, à conductibilité alternative, qui étaient employés et qui se comportaient comme le tube à limaille renfermaiaent constamment un ou plu-

sieurs contacts imparfaits de très forte résistance initiale. La continuité du circuit n'était pas nécessaire ; la conductibilité d'un de ces contacts se produisait encore, sous l'influence d'une étincelle électrique, à distance, lorsque le circuit dont il faisait partie était largement interrompu. En fermant le circuit après l'éclatement de l'étincelle active, on constatait la conductibilité.

Les contacts les plus sensibles étaient ceux qui offraient déjà, avant l'action de l'étincelle, une conductibilité presque imperceptible. Cette très faible conductibilité initiale était atteinte par une pression lentement graduée sur les conducteurs qui limitaient le contact imparfait, ou par un accroissement de la force électromotrice de la pile.

Le contact imparfait qu'une étincelle électrique rendait conducteur à distance pouvait être appelé un *radioconducteur*, puisque l'effet paraissait se produire sous l'influence d'un rayonnement. Intercalé dans un circuit de pile, le radioconducteur maintient d'abord le circuit ouvert à la façon d'un isolant, mais il livre ensuite passage au courant quand une étincelle de décharge de condensateur éclate à sa portée.

Alors que les corps conducteurs laissent passer d'emblée un courant électrique, que les corps isolants l'arrêtent, les radioconducteurs deviennent à volonté, successivement, conducteurs ou isolants : leur conductibilité est donc *intermittente*.

Dans ces expériences, *la lumière* de l'étincelle *n'intervient pas*, car le circuit récepteur, installé dans une salle éloignée, est séparé de l'étincelle par des murs : il peut d'ailleurs être enfermé dans une cave. La conductibilité du radioconducteur se produisait, sous l'influence d'une étincelle éloignée, quand on le plaçait avec son circuit

entier dans une cage en verre bien close ou dans une caisse en bois. Dans ce dernier cas, une sonnerie, que le courant mettait brusquement en activité, était quelquefois substituée à un galvanomètre dont les parois de la cage masquaient les déviations.

Tout changeait si le radioconducteur était, avec son circuit, complètement enveloppé par une *cage métallique*. Si petite que fut, cette fois, la distance des deux postes et si puissante que devint l'étincelle extérieure, le radioconducteur restait constamment insensible. Les parois de la cage pouvaient être de minces feuilles d'étain ou des toiles métalliques à mailles serrées.

Deux faits importants furent ensuite observés. *Dans une première série d'expériences*, un circuit à contact sensible était logé tout entier dans une cage métallique, et une forte étincelle extérieure ne produisait aucun effet, même quand elle éclatait au voisinage immédiat de la cage, mais une étincelle qui pouvait être assez éloignée, se montrait *active* s'il sortait par une petite ouverture de la cage *une longueur de quelques centimètres d'un fil conducteur* relié métalliquement au circuit intérieur. Le fil conducteur était isolé de la cage comme le circuit lui-même. On employait souvent une cage en toile métallique que la lumière traversait suffisamment pour qu'on pût voir, par réflexion sur un miroir, au moment de l'étincelle, la déviation du galvanomètre du circuit intérieur.

Dans une autre série d'expériences, on voyait une tige conductrice, reliée à une des branches de l'éclateur, augmenter notablement la portée d'une étincelle d'émission. Avec de pareilles tiges suffisamment longues, une étincelle éloignée, réduite à une petite fraction de millimètre, se montrait active sur un circuit de radioconducteur.

Les deux séries précédentes d'expériences ont conduit, à l'emploi des tiges conductrices annexées régulièrement plus tard, sous le nom d'*antennes*, à chacun des deux postes de la télégraphie sans fil.

Au point de vue du mécanisme de cette conductibilité provoquée on constatait qu'un radioconducteur sensible à l'action d'une étincelle à distance, se montrait encore conducteur si on le soumettait momentanément, dans son circuit, à l'action de la force électromotrice d'un nombre suffisant d'éléments de pile associés en série.

Lorsque la conductibilité développée par l'influence d'une étincelle était assez éloignée de la valeur maximum que pouvait atteindre le contact sensible, la moindre trépidation la supprimait. Il fallait un choc plus accentué si la conductibilité acquise était voisine de son maximum.

Un réglage du choc, facile à obtenir avec des étincelles qui variaient peu, permettait de réaliser des alternatives ininterrompues de conductibilité et de résistance, par succession d'étincelles et de chocs.

Dès le début, l'auteur des recherches précédentes faisait remarquer que la conductibilité provoquée dans un contact imparfait par l'étincelle était due à la *haute valeur* de la force électromotrice des courants induits que la brusque décharge d'un condensateur faisait naître à distance dans le circuit du radioconducteur.

En définitive, si l'étude des radioconducteurs faisait connaître un nouveau genre de conductibilité, elle présentait, en outre, une application de cette conductibilité en réalisant à distance la fermeture instantanée d'un circuit de courant électrique, sans liaison matérielle entre le poste de commande et le poste de travail.

Une télégraphie sans fil a trouvé là son image et ses premiers éléments[1].

Les expériences qui viennent d'être rappelées ne font intervenir aucune idée théorique. Ce sont des faits observés. On voit figurer, d'une part, une étincelle de décharge de condensateur éclatant en un poste A. D'autre part, un circuit qui renferme un élément de pile, constitué en un autre poste B, comprend un *contact imparfait* choisi et un indicateur de courant tel qu'un ampèremètre. Il n'y a aucune liaison entre les postes A et B. Quand une étincelle de décharge de condensateur vient à éclater au poste A, la circulation immédiate d'un courant, que le courant imparfait suspendait, fait tout à coup dévier l'ampèremètre du poste B ; cette circulation donne lieu, si l'on veut en B, à une autre *action quelconque* de courant électrique. L'effet a lieu à travers les murs.

La commande ainsi effectuée, par une sorte de rayonnement électrique, est *expérimentalement* indépendante de toute connaissance sur la nature de l'étincelle électrique. Ses applications n'exigeaient pas cette connaissance. La nature de la lumière et son mode de propagation n'ont été fixés qu'au début du XIXe siècle, cependant la lumière a été utilisée de tout temps. Il est vrai que, pour la lumière, notre organisme possédait un œil. Le circuit d'une pile qui renferme un radioconducteur se comporte comme un *oeil électrique* ; on n'a recours qu'en cas de besoin à cet œil indépendant.

La conductibilité intermittente d'un radioconducteur

1. Au premier jour du succès de ses mémorables expériences de 1899, entre les côtes de France et d'Angleterre, M. Marconi adressa à M. Branly la dépêche suivante qui fut transmise par télégraphie sans fil de Douvres à Wimereux :

M. Marconi envoie à M. Branly ses respectueux compliments à travers la Manche, ce beau résultat étant dû, en partie, aux remarquables travaux de M. Branly.

aurait pu être observée dès la découverte de Volta ; elle eût servi à provoquer à distance un effet *quelconque* de la pile dans son circuit. Avec un dispositif rigoureusement semblable à celui avec lequel elle a été observée et appliquée en 1890, elle aurait pu être reconnue il y a un siècle, après qu'OErsted eut vu la déviation d'une aiguille aimantée par un courant électrique. En effectuant alors la fermeture d'un circuit contenant un contact imparfait, par une étincelle électrique éclatant à distance, on aurait eu un effet utilisable. La simple déviation d'un aimant dans un circuit parcouru par un courant est un signal que la télégraphie à fil de ligne a, elle-même, d'abord, employé. Une télégraphie sans fil, du même mode, aurait ainsi pu précéder la télégraphie à fil de ligne.

GÉNÉRALITÉS SUR LES CONTACTS IMPARFAITS

Comme l'ont montré les expériences de 1890, un radioconducteur n'est pas un conducteur dont la résistance R est invariable. Considérable pour une très faible force électromotrice, sa résistance diminue numériquement notablement quand augmente la force électromotrice qui lui est appliquée ; l'intensité du courant croît alors beaucoup plus vite que proportionnellement à la force électromotrice de la source.

D'après la relation $I = \frac{nE}{R}$, qui représente l'intensité d'un courant circulant dans un circuit où un radio-

conducteur constitue la résistance principale R, l'intensité I augmente à la fois par l'accroissement du nombre *n* des éléments de force électromotrice E et par la diminution de la résistance R.

Il en était ainsi pour les radioconducteurs à contacts multiples, ayant la forme de tubes à limaille de fer, nickel, or et autres métaux, et, de même, pour des contacts uniques, tels que pointes d'acier poli sur disque ou cuvette d'acier poli, pointes de tellure sur disque ou cylindre d'argent, etc...

Si ces radioconducteurs de très grande résistance étaient d'abord placés dans un circuit qui ne renfermait qu'une faible force électromotrice, ils devenaient brusquement très conducteurs quand une décharge de condensateur avec étincelle était produite en dehors de leur circuit et ils restaient le plus souvent, longtemps conducteurs après l'action de l'étincelle électrique. Un choc les ramenait à leur résistance initiale. Le réglage du choc s'obtenait facilement pour des étincelles successives, sensiblement égales. Les alternatives de conductibilité et de résistance permettaient, soit l'inscription de dépêches, soit la production d'effets variés préparés à l'avance.

En raison de leur sensibilité, de la simplicité de leur formation et de leur réglage, les tubes à limaille furent exclusivement employés comme révélateurs d'ondes électriques, pendant les premières années de la télégraphie sans fil. Leur genre de conductibilité ne convenait plus, soit pour la réception de signaux *par téléphone* en télégraphie sans fil, soit pour la téléphonie sans fil. On a eu alors recours à des radioconducteurs spéciaux dont la modification de résistance ne persiste pas après que les oscillations électriques ont cessé d'agir. On a choisi dans ce groupe

les détecteurs redresseurs qui ne laissent pas passer également les deux sens d'un courant alternatif. L'intensité du courant qui parcourt un de ces différents contacts imparfaits croît encore constamment plus vite que la force électromotrice qui lui est appliquée.

Intercalé dans le circuit d'un courant alternatif, un redresseur, dit *parfait*, arrête complètement l'une des alternances ; le courant qui passe produit alors l'effet d'un courant continu, soit sur un téléphone, soit sur un galvanomètre ordinaire.

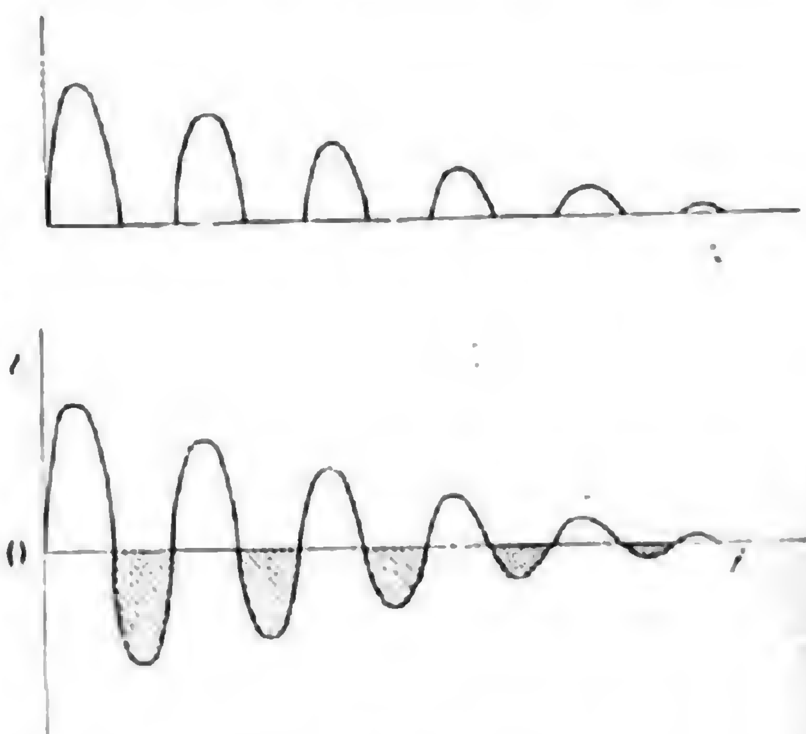


FIG. 36.

Il a été déjà indiqué, à propos du téléphone, qu'un courant alternatif de haute fréquence n'agit pas directement sur un téléphone. Redressé (fig. 36), il produit l'effet d'un courant continu, en déterminant un déplacement de la membrane. L'effet d'une tranche étroite de courant alternatif, redressée, est celui d'un courant continu de courte duré. Un bref courant alternatif à oscillations décroissantes ou amorties agit encore comme un bref courant continu s'il est redressé et il donne un choc. Une suite de tranches équidistantes alternatives amorties ou non amorties,

redressées, donne au téléphone une suite de chocs équidistants.

Quand les deux alternances d'un courant alternatif sont inégalement diminuées par le passage à travers un contact redresseur, le redresseur est dit *imparfait*. L'une des alternances ne disparaît pas complètement, mais l'effet résultant sur un téléphone ou sur un galvanomètre ordinaire est le même, à l'intensité près, qu'avec un redresseur parfait.

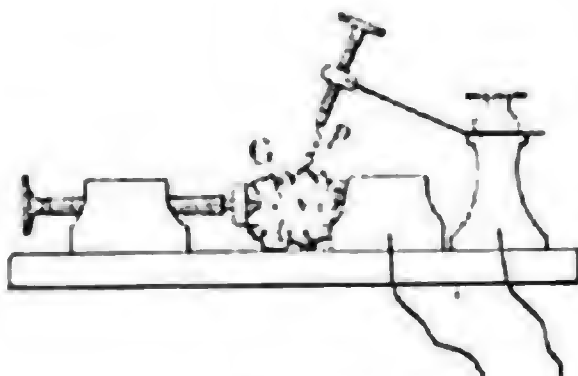


Fig. 37.

Pyrite de fer et pointe de cuivre, carborundum et pointe de carbone, sulfure de plomb et pointe de cuivre et beaucoup d'autres contacts redresseurs ont été avantageusement employés. On fait souvent usage actuellement d'un *fragment de galène* G (sulfure de plomb cristallisé) sur lequel appuie légèrement une pointe métallique *p* de cuivre ou de *platine* (fig. 37).

On verra plus loin (page 127, fig. 56), la description et le mode d'emploi d'un autre détecteur à conductibilité unipolaire, il sera aussi sensible que la galène, mais ne sera pas comme elle susceptible de se dérégler. Il se présentera sous la forme de la lampe à deux puis à trois électrodes.

PREMIERS ESSAIS DE RADIOTÉLÉGRAPHIE.

En 1895, un jeune élève du professeur Righi, à Bologne, M. Marconi, répéta, en augmentant graduellement la distance des deux postes, les expériences de radioconductibilité qui avaient été présentées à l'Académie des Sciences en 1890 et 1891 et publiées dans diverses revues.

Après de multiples essais effectués en Italie, d'abord sur terre, puis sur mer, avec des tubes à limailles métalliques, M. Marconi vint en Angleterre, où il reçut aide et encouragements.

A cause de la dissémination du rayonnement de l'étincelle, l'effet produit sur le tube et sur son circuit diminuait quand la distance augmentait entre les deux postes, mais l'appareil récepteur continuait à fonctionner si l'on faisait croître graduellement, d'abord séparément, puis à la fois l'énergie de l'étincelle de l'éclateur et la hauteur de tiges conductrices annexées aux postes.

M. Marconi mit en relief le rôle *essentiel* des tiges libres qu'il reliait, simultanément, l'une à une boule de l'éclateur au poste d'émission, l'autre à une face du contact imparfait au poste de réception. Il appelait ces tiges des *antennes*.

L'organisation des deux postes, à laquelle il s'arrêta après de longues recherches et qui fut d'abord adoptée sans changement par tous ceux que son succès entraîna sur ses traces, est désignée sous le nom d'*excitation directe*.

EXCITATION DIRECTE

Poste d'émission.

Le poste d'émission (fig. 38) comprend trois parties :

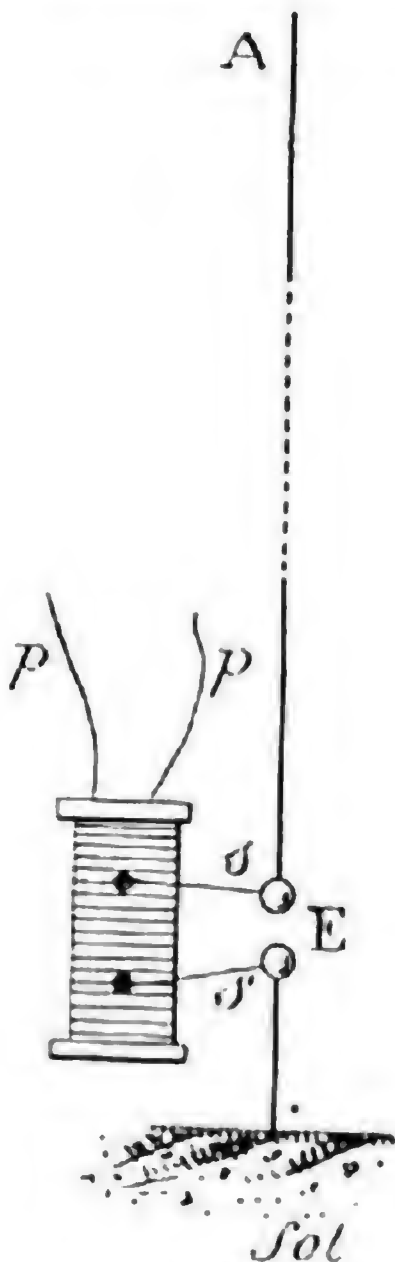


Fig. 38.

1° L'organe essentiel qui est l'excitateur, c'est-à-dire l'éclateur à étincelles oscillantes de décharge électrique. L'éclateur E consiste en deux boules métalliques séparées par un petit intervalle d'air. La ligne des centres des deux boules est verticale.

2° La boule supérieure de l'éclateur se prolonge en haut par une longue tige métallique A, nue, appelée *antenne*, qui se dresse verticalement vers le ciel. L'antenne est soutenue par un mât en bois d'une grande hauteur.

3° La seconde boule de l'éclateur est en communication avec le sol par un *très court* prolongement conducteur, vertical comme l'antenne. La communication avec le sol se fait par une une ou plusieurs plaques métalliques, reliées entre elles et enterrées dans un sol humide, afin de constituer une bonne *prise de terre*[1].

1 La prise de terre est mauvaise sur un sol rocheux ou sablonneux.

L'antenne et la terre forment les deux armatures d'un condensateur qu'on charge par le fil secondaire d'une bobine d'induction ; les deux extrémités libres *s* et *s'* de ce fil arrivent respectivement aux deux boules de l'éclateur.

Le fil primaire *p* de la bobine est parcouru par le courant continu d'une batterie d'accumulateurs. L'interrupteur automatique de la bobine coupe à intervalles très rapprochés le circuit du courant des accumulateurs.

A chaque interruption du circuit primaire de la bobine d'induction, jaillit, à l'éclateur, une étincelle de décharge de condensateur. Cette étincelle doit être blanche, rectiligne et claquante.

Le circuit primaire de la bobine comprend un manipulateur M, semblable au manipulateur de la télégraphie ordinaire à fil de ligne. Ce manipulateur permet de fermer à la main, pendant un temps variable à volonté, le circuit que l'interrupteur automatique de la bobine d'induction ouvre de son côté, périodiquement, en *i*, de 50 à 100 fois par seconde (fig. 39). Pendant que l'expéditeur maintient abaissé le manipulateur, le fonctionnement de l'interrupteur automatique produit un certain nombre

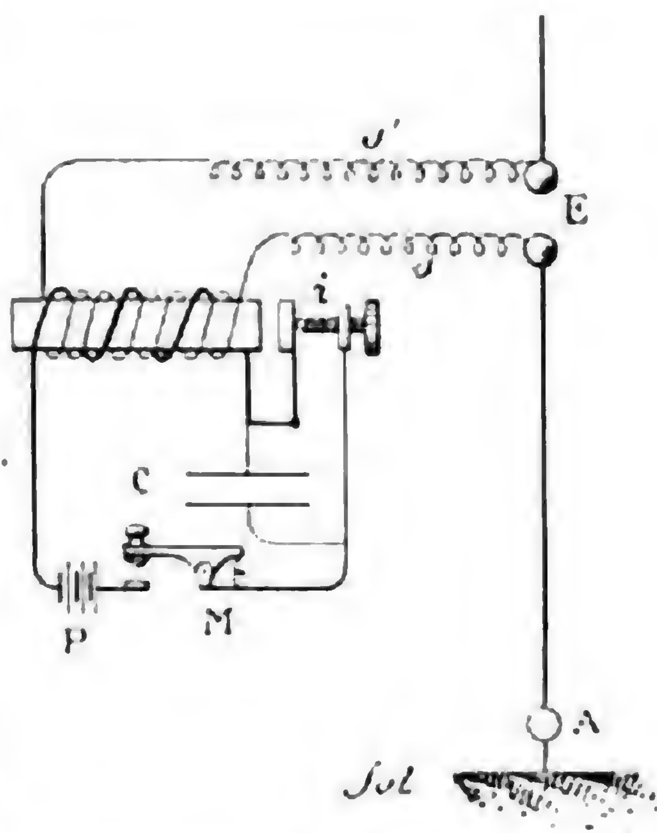


Fig. 39.

d'ouvertures et de fermetures du circuit primaire, et, à chaque ouverture, une étincelle jaillit entre les boules de l'éclateur.

Chaque étincelle est accompagnée de courants alternatifs de haute fréquence qui parcourent le circuit de décharge et l'antenne. Par la partie libre de l'antenne qui part de la boule supérieure de l'éclateur, ils donnent lieu à un rayonnement qui se disperse dans l'espace. Dans cette partie libre l'antenne doit être parfaitement isolée afin que des déperditions par les supports ne diminuent pas l'énergie électrique rayonnée.

L'expéditeur opère, pour une émission, comme en télégraphie ordinaire ; l'apprentissage est le même. S'il ferme le manipulateur pendant un temps très court, un signal bref correspond à quatre ou cinq étincelles de l'éclateur. Avec une fermeture plus soutenue du manipulateur pour un signal long, le nombre des étincelles de l'éclateur s'élève à 15 ou 20. Signaux courts ou *points* et signaux longs ou *traits* se succèdent suivant l'alphabet Morse du télégraphe à fil de ligne (fig. 30).

L'antenne étant verticale, son rayonnement électrique se dissémine sans qu'il y ait de direction particulièrement favorisée. Il n'y en a qu'une très minime fraction qui atteigne le poste de réception.

Poste de réception.

Le *poste de réception* comprend trois parties comme le poste d'émission. Il y avait au poste d'émission une antenne radiatrice verticale, un éclateur sur le trajet de cette antenne et un court prolongement vertical avec

prise de terre. On voit au poste de réception (fig. 40) : 1° Une longue tige A', ou *antenne collectrice*, verticale comme l'antenne radiatrice et primitivement de même longueur ; 2° sur le trajet de l'antenne collectrice, un tube à limaille ou un autre contact imparfait D qui est l'organe sensible de la réception ; 3° une prise de terre.

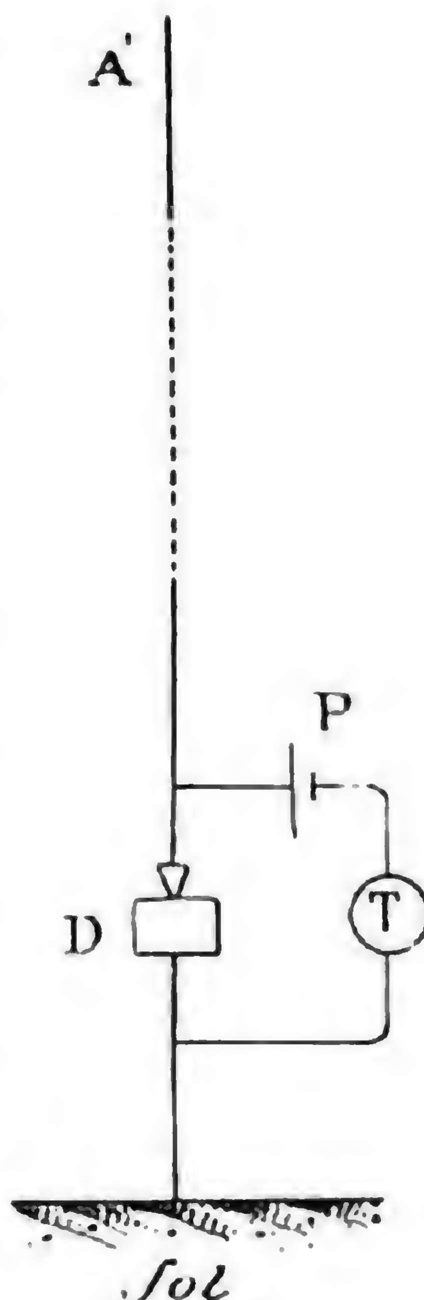


Fig. 40.

En dérivation sur l'éclateur se branchait le fil secondaire de la bobine d'induction. Ici, en dérivation sur le radioconducteur, il y a un petit circuit qui comprend un élément de pile P de faible force électromotrice, souvent voisine d'un volt, et un indicateur T de courant.

Les courants alternatifs de haute fréquence qui circulent dans l'antenne d'émission, à l'occasion d'une étincelle de l'éclateur, font naître, par induction, des courants alternatifs dans tous les conducteurs de l'espace, quels qu'ils soient et, en particulier, dans l'antenne de réception. Avant l'éclatement d'une étincelle d'émission, la résistance du contact imparfait de l'antenne de réception était très forte, pratiquement infinie. Quand une étincelle éclate, les courants qui sont induits dans

l'antenne de réception affaiblissent assez la résistance du radioconducteur pour que, dans son circuit de dérivation, le courant continu de l'élément de pile se trouve fermé et agisse nettement sur l'indicateur de courant.

Dans un poste qui doit être, à tour de rôle, d'émission et de réception, *une seule antenne suffit*. On la rattache suivant le besoin, soit au circuit d'émission, soit au circuit de réception.

En dehors des réceptions, le contact imparfait est séparé de l'antenne et enfermé dans une boîte métallique hermétiquement close. Il est ainsi protégé d'une manière efficace contre l'action des étincelles, qui vont éclater dans son voisinage à l'occasion d'une émission.

Si l'on compare un circuit de télégraphie ordinaire à l'ensemble des deux postes en correspondance d'une télégraphie sans fil, on peut dire que, dans cette dernière, le fil de ligne de la télégraphie ordinaire est réduit à *deux tronçons extrêmes*, l'un au départ, l'autre à l'arrivée, qui constituent les antennes. Entre ces antennes, une induction alternative de haute fréquence se propage par l'espace libre d'une station à l'autre. A chacune des deux stations, dans l'une comme dans l'autre télégraphie, une prise de terre remplace le fil de retour.

En apparence, le circuit de la commande avec fil, qui occupait les deux postes réunis par le fil de ligne, se trouve, en télégraphie sans fil, transporté, en entier au poste d'arrivée. On y voit pile, récepteur, fil de jonction ; le manipulateur lui-même ne manque pas. Son interruption est en effet remplacée par le minime intervalle qui sépare les deux faces du contact imparfait. Lorsque la conductibilité de cet espace imperceptible est provoquée par une étincelle de décharge du poste de commande,

tout se passe comme si, à l'occasion de cette étincelle, une main invisible fermait le circuit en appuyant l'une contre l'autre les deux faces du contact imparfait.

En révélant au poste de réception la production d'une étincelle d'émission, le circuit local de réception se comporte comme un *œil électrique*, où le contact imparfait est la partie impressionnée.

Inscription.

Pendant les premières années de l'organisation de la télégraphie sans fil, le courant de pile qu'une étincelle électrique fermait brusquement à distance, au poste de réception, était appliqué à produire deux effets : 1° *Inscription* d'un signal ; 2° *Frappe* sur le radioconducteur, pour lui rendre sa résistance et le mettre en état d'être impressionné de nouveau par une autre étincelle. Ces deux effets peuvent avoir lieu par l'intermédiaire d'un électroaimant inscripteur. Comme ils exigent un courant supérieur au courant très faible que peut supporter un radioconducteur délicat, l'indicateur de courant, dans le circuit de la pile et du radioconducteur, est remplacé par un relais sensible qui ferme un circuit local, comme dans les longues lignes de la télégraphie ordinaire.

Quand une étincelle brève éclate au poste d'émission, la fermeture du circuit du contact imparfait est réalisée par la conductibilité brusque du radioconducteur et le relais produit immédiatement la fermeture du circuit local. Dans ce dernier circuit, l'électroaimant de l'inscripteur Morse, traversé par le courant d'une pile suffisamment forte, attire vivement sa palette de contact ; celle-ci tourne autour de son milieu, l'une de ses extré-

mités se soulève et inscrit le signal, l'autre extrémité s'abaisse, puis, après avoir ouvert le circuit du radioconducteur, elle frappe contre un butoir qui limite sa course. Le butoir étant solidaire du support du radioconducteur, celui-ci perd alors sa conductibilité par la transmission du choc. La suppression de la conductibilité du radioconducteur est ainsi effectuée pendant l'ouverture de son circuit.

Pour l'inscription des dépêches, aussi bien que pour la réalisation d'effets variés par commande à distance sans fil de ligne, les contacts imparfaits dont la conductibilité se prolongeait après l'action de la force électromotrice d'induction étaient d'un emploi avantageux.

Le grand développement des communications radiotélégraphiques a provoqué des simplifications. L'inscription des dépêches a été abandonnée et la réception des signaux se fait au son avec un téléphone[1].

Réception au son par téléphone.

La réception par téléphone est à la fois simple, rapide et sensible.

Les contacts imparfaits à conductibilité prolongée ont dû être remplacés par des contacts dont la conductibilité cesse immédiatement avec la cause efficiente et qui ont, en outre, la propriété de laisser passer plus aisément un des deux sens du courant électrique.

Au poste de réception, le contact redresseur, qui consiste, par exemple, en un cristal de galène et un fil

1. La réception au téléphone n'a été introduite qu'après plusieurs années de pratique en télégraphie sans fil, mais en raison de l'universalité actuelle de son emploi, il ne sera d'ordinaire ici question, dans la suite, que de ce mode spécialde réception.

de platine, est substitué à l'ancien radioconducteur. Un téléphone T a pris la place qu'occupait l'indicateur de courant, puis le relais dans le cas de l'inscription ; tout circuit local de travail a disparu.

A chaque étincelle du poste d'émission, un courant alternatif induit de très courte durée parcourt l'antenne de réception ; ce courant, redressé, donne un choc au téléphone. Les courants d'un train d'oscillations qui passent dans un sens traversent le détecteur, ceux de sens contraire que le détecteur arrête donnent un choc au téléphone. Une fermeture brève au poste d'émission fait entendre quatre ou cinq chocs pour un point ; une fermeture plus longue en donnera quinze ou vingt qui produisent l'impression prolongée d'un trait.

Dans les divers modes de télégraphie par étincelles ou par ondes amorties, le dispositif de réception au téléphone restera le même que dans l'excitation directe. Il conviendra encore en téléphonie sans fil.

*

Lorsque en 1899, après quatre années de travaux ininterrompus, M. Marconi fut parvenu à organiser des communications régulières entre deux postes à excitation directe distants d'environ 50 kilomètres, entre Douvres d'une part et Wimereux près de Boulogne, d'autre part, puis à constater que les différents états de l'atmosphère, le vent, la brume, la pluie, la neige ne contrarient pas les

transmissions et enfin à voir traversés ou contournés les obstacles qui arrêtent la lumière, des installations d'études surgirent de tous côtés: Les essais persévérants de M. Marconi avaient ouvert une voie qui était jugée à la fois intéressante et profitable.

Alors, parallèlement aux postes que M. Marconi ne cessa pas de perfectionner et de multiplier en Angleterre et en divers pays, beaucoup d'autres furent établis et contribuèrent à hâter les progrès.

Pour obtenir les premiers résultats, il avait suffi, après qu'un dispositif avantageux pour l'excitation directe eut été adopté, de continuer les expériences du début en augmentant graduellement l'énergie des décharges et la hauteur des antennes, à mesure que les deux postes en correspondance étaient écartés davantage. Mais, dorénavant, de nouveaux progrès allaient exiger de grands efforts. Il fallait établir un accord entre les postes en correspondance, pour éviter la confusion et augmenter la portée. On ne se trouve plus ici dans les conditions particulièrement simples de la télégraphie électrique ordinaire où, quel que soit l'éloignement, il ne faut qu'un fil, un courant et un révélateur de courant et où la dépêche, à moins d'une intervention étrangère, ne s'écarte pas de la route qui lui est imposée par le mode même de communication.

CONDITIONS D'ACCORD DE DEUX POSTES

Les problèmes à résoudre pour le développement de la radiotélégraphie, étaient complexes et, il y a un siècle, ils auraient peut-être paru difficilement abordables, mais les connaissances que l'on possédait en 1899 sur l'étincelle, sur les circuits à éclateur et sur leurs courants alternatifs devaient abréger la durée des tâtonnements.

D'abord, on n'avait pas à déduire de la seule observation des phénomènes, la nature de l'agent qui déterminait la conductibilité d'un contact imparfait en présence d'une étincelle électrique. On savait, en effet, qu'un courant brusque de décharge fait naître, à distance, dans le circuit du contact des courants spéciaux, dits induits, et, c'est à ces courants induits que l'on attribuait naturellement l'effet observé.

D'autre part, Feddersen avait montré que le courant de décharge d'un condensateur, par étincelle, est un courant alternatif périodique de haute fréquence. On pouvait lui appliquer la loi fondamentale de l'induction, ou la proportionnalité de la force électromotrice induite à la vitesse de variation du flux inducteur enveloppé par le circuit.

Il résultait enfin des recherches de Hertz que les oscillations électriques d'un courant de décharge se dispersent dans l'espace, avec une vitesse constante en conservant leur période. Ces oscillations, conformément à leur caractère périodique, étaient susceptibles de présenter les phénomènes connus d'*interférences*. L'analogie des

phénomènes d'interférences observés par Hertz avec les phénomènes acoustiques correspondants pouvait encore servir de guide d'une façon efficace. L'explication du rôle des antennes va en donner un exemple.

ROLE DES ANTENNES

C'est par une interférence proprement dite, semblable à celle que présente un *tuyau fermé* en Acoustique, que l'on peut se rendre compte du pouvoir rayonnant électrique d'une longue tige cylindrique, verticale, A, dont une extrémité est libre, tandis que sa base est l'une des boules d'un éclateur E. La base de la tige, qui aboutit à la boule supérieure de l'éclateur, reçoit de chaque étincelle un mouvement oscillatoire, ou vibration électrique, dont la période est déterminée et constante. Sa valeur dépend de la constitution du circuit de décharge.

Ce mouvement oscillatoire se propage de proche en proche le long de la tige. Arrêté à l'extrémité libre, il se réfléchit à la façon d'un mouvement sonore qui part de l'embouchure d'un tuyau fermé et rebrousse chemin quand il arrive au fond. L'éclateur se comporte pour l'antenne comme l'embouchure pour le tuyau. On sait qu'on peut, à tout instant, composer en chaque point du tuyau deux mouvements vibratoires du milieu en vibration ; l'un des mouvements vient directement de l'embouchure, l'autre, réfléchi sur le fond, est inverse. L'extrémité libre d'une antenne, comme le fond d'un tuyau fermé est un *nœud* où le mouvement oscillatoire direct, venu de l'éclateur, et le mouvement inverse réfléchi s'annulent. Le mouvement résultant est au contraire

maximum à l'embouchure d'un tuyau, celle-ci est un *ventre*. Il y a de même un ventre à l'éclateur.

Comme dans un tuyau sonore, nœuds et ventres se suivent, la distance d'un nœud au ventre consécutif est le quart de la longueur d'onde du mouvement vibratoire.

On sait que, pour le son le plus grave que peut rendre un tuyau fermé, il n'y a qu'un nœud, qui est le fond et un ventre, qui est l'embouchure. La longueur du tuyau est alors le *quart de la longueur d'onde* du son qui est rendu et le tuyau est dit vibrer en quart d'onde.

L'expérience a montré qu'une antenne libre vibre aussi en quart d'onde. Il faut entendre par là que, si, à cette vibration naturelle ou *fondamentale*, s'ajoutent des vibrations dont la fréquence est 3, 5, 7 fois plus élevée (la loi des harmoniques des tuyaux fermés étant appliquée aux antennes), l'amplitude de ces vibrations surajoutées est relativement très faible.

Ainsi, pour une antenne de 75 mètres, la longueur d'ondulation de la vibration émise sera 300 mètres, ou 30.000 centimètres. D'après $3.10^{10}=N. 30.000$, la fréquence N, qui correspond aux 75 mètres de hauteur de l'antenne est 10^6 (un million).

En poursuivant l'analogie d'une antenne et d'un tuyau fermé rendant sa note la plus grave, on peut admettre, ce qui a été démontré pour un tuyau vibrant en quart d'onde, que « les effets oscillatoires qui émanent des différentes tranches de l'antenne, perpendiculaires à sa longueur, sont *concordants*, étant de même sens et dans la même phase de leur vibration ». Ils s'ajoutent donc en tout point éloigné et cette addition implique un *grand pouvoir rayonnant*.

Le potentiel électrique jouant le rôle de la pression de

l'air dans un tuyau sonore, un nœud de mouvement est un ventre de pression. On voit, en effet, pour de fortes décharges à l'éclateur, des déperditions lumineuses, dues

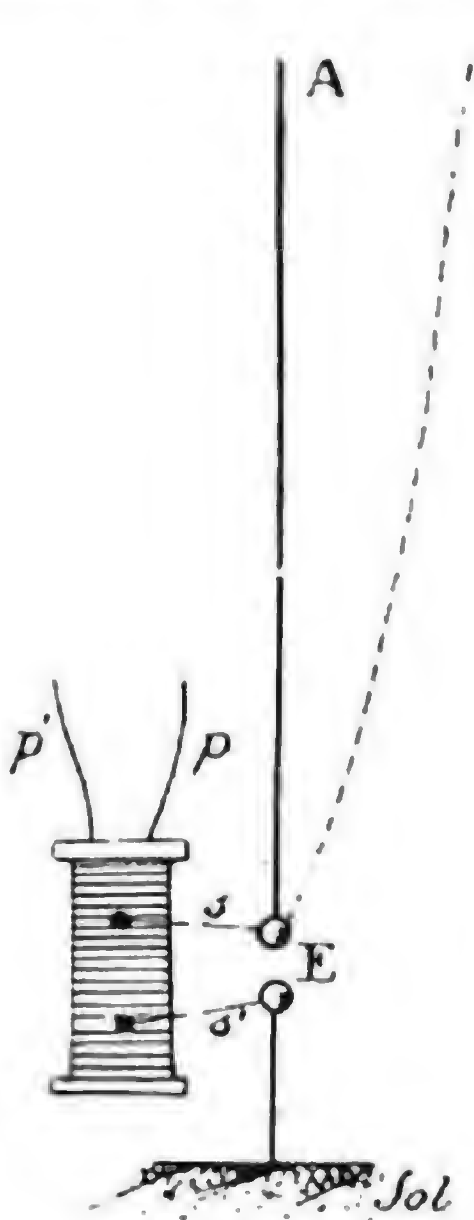


Fig. 41.

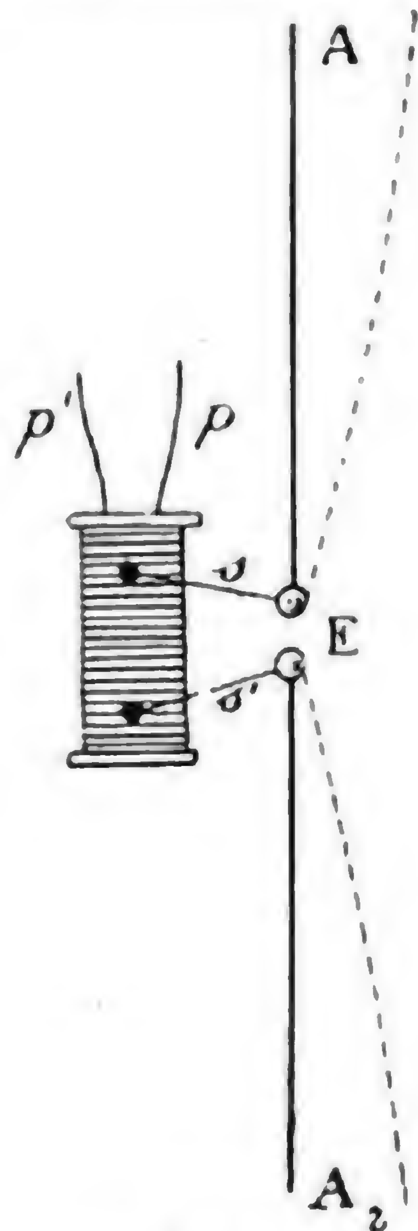


Fig. 42.

à de hauts potentiels, se produire à l'extrémité libre de l'antenne, où un ventre de pression correspond au nœud de mouvement (fig. 41).

Si, au lieu de relier au sol, par un court prolongement

métallique, la seconde boule de l'éclateur, on lui adjoint une seconde tige se dirigeant en sens inverse de celle qui se dresse vers le ciel, et ayant la même longueur, la comparaison acoustique donne encore d'utiles indications.

Dans ces nouvelles conditions, où l'éclateur se trouve intercalé entre deux tiges égales, l'éclateur et ses deux antennes sont assimilables à un *tuyau fermé aux deux bouts* ; il y a, en son milieu, une embouchure qui est un ventre de mouvement. Les deux extrémités libres sont des nœuds de mouvement et des ventres de pression ou de tension. (fig. 42)[1].

La longueur d'ondulation est la même pour chacune des deux tiges, qui vibrent séparément en quart d'onde ; l'ensemble vibre en demi-onde. A un même instant, les amplitudes des oscillations dans toutes les sections transversales sont concordantes et de même sens.

ROLE DES CADRES

Au lieu d'une antenne, dont le circuit est dit *ouvert*, on a songé à employer un cadre vertical. Ici le *cadre est fermé* et n'a qu'un pouvoir rayonnant réduit. En effet, pour un circuit émetteur fermé, tel qu'un rectangle, il y a, au même instant, des mouvements qui ont lieu dans un sens en certaines parties du circuit et des mouvements de sens contraire en d'autres. De là, pour un point éloigné, des superpositions de mouvements opposés. Ces mouvements se détruisent *complètement* en un point situé sur une perpendiculaire menée au plan du cadre par son

1. Dans les figures 41 et 42, les courbes en traits discontinus qui partent de l'éclateur représentent la distribution des potentiels, à chaque décharge, le long des antennes A, A_1, A_2.

milieu. Ils se contrarient encore pour un point situé dans le plan du cadre, mais deviennent utilisables pour de petites longueurs d'onde.

Des considérations semblables s'appliquent, pour la réception, soit à un circuit ouvert d'antenne, soit à un circuit fermé de cadre. En définitive, une *antenne* est, également, un *bon radiateur* et un *bon récepteur*, tandis qu'un cadre fermé convient également peu pour l'émission et pour la réception, au moins dans les circonstances qui se rapportent aux dispositifs précédents.

CIRCUITS OSCILLANTS ET RÉSONANCE

La nature ondulatoire et périodique des oscillations électriques qui se propagent dans le circuit de décharge d'un condensateur a favorisé les premiers progrès de la télégraphie par étincelles. L'entrée en résonance d'un circuit en oscillation électrique sous l'influence d'un autre circuit parcouru par des oscillations de même période a été aussi mise heureusement à contribution.

La résonance est un état particulier d'accord dans lequel peuvent être placés différents *systèmes physiques, dits oscillants*. Ses lois générales ont servi de guide.

Systèmes oscillants.

Un système oscillant a une position d'équilibre stable. En lui donnant une impulsion, on lui communique une énergie de mouvement. Ecarté de sa position d'équilibre, il la dépasse jusqu'à ce qu'il ait acquis une énergie potentielle égale au travail dépensé pour le déplacer. A cette

conversion d'énergie de mouvement en énergie potentielle succède, dans le retour vers la position d'équilibre, une conversion inverse d'énergie potentielle en énergie de mouvement. Les mêmes conversions alternatives se succèdent. Les propriétés des systèmes oscillants, étudiées par les physiciens pour différents systèmes soumis à des forces variées, tels que *pendules et corps sonores*, s'appliquent aux circuits oscillants électriques.

Pour tout système qui peut osciller *librement*, la période de ses oscillations libres, ou sa *période propre* a une valeur qui dépend de *grandeurs constantes* spéciales à sa constitution. Pour un système oscillant électrique, ces constantes sont sa *résistance* électrique R, sa *capacité* électrique C, sa *self-induction* L. Chaque portion du circuit a une capacité, mais si un condensateur proprement dit est intercalé dans le circuit, la capacité totale du circuit est approximativement la capacité du condensateur. S'il y a une spirale dans le circuit, la self-induction totale du circuit est sensiblement égale à la self-induction de la spirale.

Résonance.

On a reconnu que si deux systèmes oscillants de même nature et indépendants sont en présence, l'un en oscillation entretenue, l'autre en repos, le système qui était en repos reçoit de l'autre, lorsque le milieu qui les sépare transmet la vibration, des impulsions qui lui communiquent un mouvement oscillatoire d'amplitude croissante. Le système qui était en repos finit pas osciller avec la période agissante, alors même que sa période propre est différente, si l'action du premier système persiste assez longtemps. Une oscillation imposée au

système influencé dans ces conditions a une amplitude faible lorsque les deux périodes propres sont différentes ; elle est alors dite *forcée*. Dans le cas où, par leur constitution, les deux systèmes avaient *la même période propre*[1], alors qu'ils oscillaient *librement*, l'oscillation du système influencé augmente progressivement d'amplitude. Par une succession d'impulsions, le système excitateur transmet graduellement une fraction de son énergie au système influencé. Les résistances qui contrarient le mouvement oscillatoire transmis allant en croissant à mesure que son amplitude augmente, il arrive un moment où elles absorbent toute l'énergie communiquée par le système excitateur. A partir de ce moment, l'amplitude des oscillations du système influencé cesse de croître et un régime permanent s'établit *en résonance*.

Constatée directement avec deux pendules pesants de même période, la résonance est très aisément observée en Acoustique, avec deux instruments accordés, soit de même espèce tels que deux diapasons, soit d'espèces différentes, tels qu'un diapason et un tuyau sonore.

La résonance entre deux systèmes oscillants électriques peut être mise à son tour en évidence. Pour cela, on forme deux circuits ayant chacun self-induction et capacité, mais de faible résistance, auxquels s'applique l'expression de la période propre $T = 2\pi \sqrt{CL}$, quand ils deviennent le siège de vibrations électriques. Ils seront susceptibles d'être accordés en faisant varier dans l'un d'eux la capacité ou la self-induction.

On fait jouer le rôle d'excitateur à l'un des deux circuits ; dans ce but, on le munit d'un éclateur E et on charge

1. Ou si la période de l'un est un multiple entier de la période de l'autre.

son condensateur C (qui représente sa capacité) par les pôles du fil secondaire *ss'* d'une bobine d'induction (fig. 43). Le second circuit fermé, appelé à jouer par induction le rôle de récepteur, n'a pas d'éclateur ; il comprend un ampèremètre thermique A. Quelle que soit, au début, la composition relative des deux circuits, à une succession rapide d'étincelles dans le premier correspond bientôt dans le second, qui est voisin, une déviation fixe de l'ampèremètre.

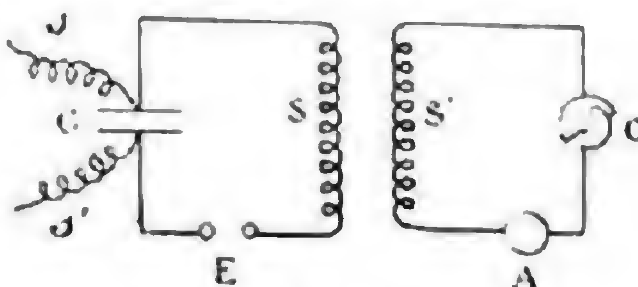


Fig. 43

Laissant alors le circuit excitateur invariable, on modifie la capacité C' du circuit récepteur (fig. 43) s'il est muni d'un condensateur à capacité variable, jusqu'à obtenir une indication maximum à l'ampèremètre[1]. Les impulsions répétées, dues au premier circuit, ont déterminé à ce moment dans le second une intensité maximum. En calculant alors, pour chacun des deux circuits, le produit de sa capacité par sa self-induction, on trouve des produits égaux. *L'égalité des périodes ou la syntonisation correspond donc à la résonance.*

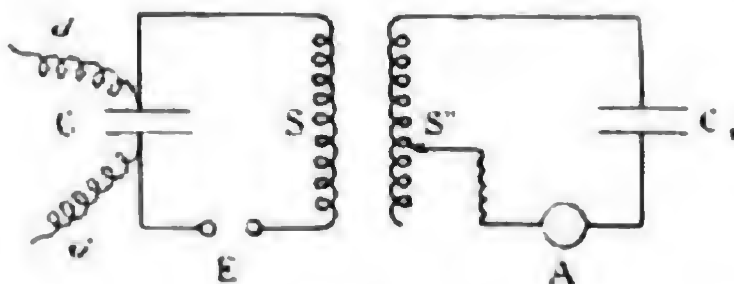


Fig. 44.

1. Laissant constante la capacité du circuit récepteur, on peut aussi faire varier la self-induction en augmentant ou en diminuant le nombre des spires d'une spirale S', qui fait partie du circuit (fig. 44).

Les circuits oscillants précédents sont fermés. Si l'on écarte progressivement les armatures du condensateur de l'un d'eux, sa capacité diminue, mais le milieu de séparation est encore un espace où s'exercent des actions électriques. On peut ainsi passer progressivement à un circuit ouvert puis à un simple fil. Un circuit ouvert formé soit de conducteurs isolés soit de conducteurs partiellement réunis à la terre possède une période propre.

On peut mettre en résonance deux circuits oscillants ouverts ou encore un circuit ouvert et un circuit fermé. Les deux circuits ouverts seront deux antennes réunies séparément au sol par leur partie inférieure, elles présentent à leurs bases des spirales parallèles, disposées en regard l'une de l'autre. L'une des antennes, avec son éclateur, peut être considérée comme une antenne d'émission. Un ampèremètre thermique occupe la partie inférieure de la seconde. On excite l'antenne d'émission par son éclateur en laissant son circuit invariable. La seconde antenne, primitivement en repos électrique, entre par influence en oscillation ; en modifiant alors sa constitution on la met en résonance avec la première. Cette résonance est accusée par un maximum d'intensité observé sur l'ampèremètre thermique. On vérifie comme précédemment que cette résonance correspond encore à l'*égalité des périodes* pour les deux circuits associés[1].

1. Pour étudier les phénomènes d'induction qui se produisaient au voisinage de son excitateur, Hertz s'était servi d'un cadre circulaire qu'il déplaçait dans le champ d'action des étincelles de décharge. Le cadre était formé avec un fil métallique dont les extrémités voisines étaient terminées chacune par une petite boule. Des étincelles, dues aux courants induits circulant dans le cadre, éclataient entre les deux boules.

Pour un même écart de ces deux boules, dans les mêmes conditions de position et d'orientation du cadre par rapport à l'excitateur, Hertz avait reconnu que les étincelles induites offraient un maximum pour un *rayon déterminé de la circonférence du cadre*.

Il avait donné à son cadre le nom de *résonateur*. Dans ce cas particulier, il s'agissait d'une résonance obtenue entre un cadre fermé et un excitateur constitué par deux circuits ouverts concordants.

Avantages de la résonance électrique.

La résonance, ou l'accord entre deux circuits, comme l'accord entre deux diapasons, rend un circuit de réception *plus sensible* à l'action d'un circuit d'émission qui lui communique de l'énergie par une succession d'impulsions efficaces et favorise son entrée en oscillation. Il y a donc un grand avantage à rendre préalablement égales les périodes des circuits de deux postes qui doivent être mis en correspondance.

Afin d'accroître la portée, on a recours à de puissantes décharges qui exigent une très forte dépense d'énergie. La résonance a pour effet de mieux utiliser cette énergie. D'autre part, si les stations sont nombreuses dans une même région, il importe que les postes qui doivent rester en correspondance puissent avoir entre eux des communications exclusives, sans être troublés par des émissions étrangères. Afin d'arriver à ce résultat, après avoir attribué des longueurs d'ondes spéciales aux antennes des divers groupes, on s'attache, en mettant en résonance les postes d'un même groupe à ne recevoir dans ce groupe que des signaux de sa longueur d'onde. On réalise de cette façon une *syntonisation* dans chaque groupe.

Toutefois il ne suffit pas d'accorder deux postes pour que leur correspondance ne risque pas d'être troublée. En effet, un poste puissant agit sur les autres postes, sans accord préalable, par une vive impulsion soudaine, qui produit l'effet d'un choc. En outre, un accord établi entre les périodes reste sans efficacité pour conduire aux avantages de la résonance, si les oscillations du corps oscillant excitateur s'amortissent trop rapidement.

Influence de l'amortissement sur la resonance.

Quand, en modifiant la constitution de deux corps oscillants, on a établi l'égalité de leurs périodes, l'un d'eux pris comme excitateur ne mettra pas l'autre en oscillation s'il n'agit pas par un *nombre suffisant d'oscillations*. Pour que des ébranlements périodiques répétés, en accumulant leurs effets, augmentent graduellement l'amplitude des oscillations qu'ils ont provoquées, il faut qu'ils soient suffisamment prolongés. En résonance acoustique, cette condition est aisément remplie avec deux diapasons A et B accordés. Dans le cas d'une excitation maintenue pendant dix secondes, à raison de 500 vibrations par seconde, le diapason vibrant A transmet par l'air 5.000 impulsions au diapason récepteur B. Chaque impulsion est individuellement minime, mais l'*addition de toutes les impulsions aboutit* à un écart dont l'amplitude devient suffisante pour que le diapason primitivement en repos, rende lui-même un son. Ce son se prolonge alors seul si l'on arrête l'excitateur avec la main.

En télégraphie par étincelles, dans l'excitation directe, une succession suffisante d'impulsions est loin d'être réalisée par le *circuit oscillant d'émission*. Ce circuit oscillant, comme un pendule pesant placé dans un milieu qui oppose une grande résistance à son mouvement, s'arrête après un très petit nombre d'oscillations rapidement décroissantes. Ses oscillations sont très *amorties*.

L'énergie initiale, limitée, d'un corps vibrant se dissipe, en général, à la fois par divers frottements et par des mouvements communiqués au milieu ambiant. Pour les étincelles de décharge de condensateur, l'amortissement

provient de la résistance opposée par le circuit de décharge et spécialement par l'intervalle gazeux compris entre les boules de l'éclateur. Une partie de l'énergie de la décharge est ainsi convertie en chaleur et les valeurs maxima de l'intensité de son courant alternatif décroissent rapidement.

Les oscillations de chaque étincelle d'émission forment un groupe, appelé un *train*, qui ne comprend que quelques oscillations. La première du groupe contient la plus grande partie de l'énergie de la décharge et l'effet dû à un train est, sensiblement, *celui d'un choc unique*.

A chaque train qui lui vient du poste d'émission, le système électrique de l'antenne de réception est donc brusquement écarté de sa position d'équilibre et oscille avec la période qui convient à sa constitution. La longueur d'onde de ses oscillations *libres* est la plus grande de celles que permet sa longueur : la base de l'antenne est un ventre de courant et son sommet est un nœud ; il n'y a pas de nœuds et de ventres intermédiaires.

Mise en vibration, l'antenne réceptrice n'effectue, elle-même, qu'un nombre très réduit d'oscillations électriques ; la cause principale de cette réduction est la grande résistance du contact imparfait.

Deux trains d'émission, provenant de deux étincelles consécutives de l'éclateur, sont tellement espacés (fig. 45)



FIG. 45.

par rapport à la durée d'un train, que l'effet, déjà minime de chaque train, n'a pas laissé d'impression sur l'antenne réceptrice quand le suivant agit à son tour.

Ces conditions spéciales suppriment tout avantage qui pourrait résulter d'un accord préalablement établi entre les périodes propres des deux antennes, puisqu'il ne peut se produire entre elles de résonance effective. L'antenne d'émission n'exerce donc pas alors, sur une antenne de réception accordée, un effet pratiquement différent de celui qu'elle exerce sur une antenne quelconque, non accordée, située dans son champ d'action.

La vibration électrique d'une antenne d'émission se comporte alors comme une *explosion* qui fait vibrer toutes les vitres d'alentour ; la période de vibration de chaque vitre est celle qui répond à ses dimensions et à son *mode individuel de fixation*.

Il faut ajouter qu'une antenne de réception est, comme une tige de paratonnerre, influencée par l'électricité atmosphérique ; toute décharge orageuse, quelles que soient sa provenance et sa période, y fait naître des oscillations électriques, comme dans tous les conducteurs de la région ; elle provoque ainsi des signaux dénommés *signaux parasites*. Par leur répétition et par leur intensité, les signaux parasites peuvent brouiller toute correspondance ; cela est fréquent dans les pays chauds.

IMPERFECTIONS DE L'EXCITATION DIRECTE

L'excitation directe, premier mode organisé de la télégraphie sans fil, avait mis en relief les principaux caractères du nouveau procédé de communication par rayonnement électrique, mais l'excitation directe est fort imparfaite. Si son dispositif est simple, le condensateur particulier dont l'antenne et le sol, séparés par l'éclateur,

forment les armatures, n'a qu'une très petite capacité et ne fait circuler par une décharge, que *peu d'électricité*. Aussi, vu la *vaste dissémination* dans l'espace d'une faible énergie, la partie utilisée est fort minime.

Etant donné que l'énergie d'une décharge de condensateur croît à la fois avec la différence de potentiel des armatures et avec leur capacité, si la capacité est insuffisante, ne peut-on pas accroître la différence de potentiel ?

Un *accroissement de la différence de potentiel*, la capacité restant la même, correspondrait à un plus grand écart des boules de l'éclateur et exagérerait la résistance de l'étincelle : il y aurait alors à craindre la *suppression des oscillations* de la décharge. D'autre part, un accroissement de la différence de potentiel rendrait importante la *déperdition* de la charge par l'air et par les supports. Ces motifs firent préférer l'accroissement de la capacité.

A l'émission, les oscillations de chaque décharge sont rapidement réduites par la grande résistance de l'air de l'éclateur ; à la réception, l'amortissement des oscillations est dû à la grande résistance du contact imparfait.

Par une *excitation indirecte*, on a réussi, à la fois, à accroître la quantité d'électricité des décharges et à favoriser la résonance en diminuant les amortissements.

EXCITATION INDIRECTE

Pour les grandes et moyennes portées on a adopté une excitation *induite* ou *indirecte*. La réception est également indirecte et chacun des deux postes comprend deux circuits distincts : l'un fermé, l'autre ouvert.

Au poste d'émission, de *fortes décharges* par étincelles sont produites dans le circuit fermé. L'énergie des décharges est dispersée par une antenne qui forme un circuit ouvert rayonnant associé par induction au circuit fermé.

Au poste de réception l'antenne du circuit ouvert collecteur recueille une très petite partie de l'énergie rayonnée au départ. Ce circuit ouvert est associé par induction à un circuit fermé dans lequel est intercalé un contact imparfait. En dérivation sur le contact imparfait est branché latéralement un petit circuit qui comprend un élément de pile et un téléphone.

Dans chacun des deux postes, la *liaison par induction* du circuit ouvert et du circuit fermé se fait par deux spirales parallèles, L et L' dont l'une est *intérieure à l'autre*[1]. Ces deux spirales constituent un transformateur sans noyau de fer. Chaque antenne, dont l'extrémité libre est dressée vers le ciel, se continue vers sa base par sa spirale d'induction, avant de plonger dans le sol.

Le circuit fermé du poste d'émission (fig. 46) comprend un condensateur C, un éclateur E et une spirale d'induction L. On peut charger le condensateur avec une bobine d'induction[2]. Les extrémités *ss'* du fil secondaire de la bobine aboutissent aux deux boules de l'éclateur. Le fil primaire *pp'* de la bobine est parcouru par un courant continu que fournit une batterie d'accumulateurs. Le manipulateur reste placé dans le circuit d'alimentation du fil primaire de la bobine ; il provoque

1. Pour la clarté du dessin, les spirales L et L', associées à l'émission, comme à la réception, sont écartées dans les figures (fig. 46 et 47).

2. Le condensateur peut aussi être chargé par un courant continu de grande intensité qui n'éprouve pas de transformation par une bobine. La source de ce courant est : soit une batterie de nombreux accumulateurs, soit un groupe de machines dynamoélectriques associées en série. Le condensateur peut aussi être chargé par un courant alternatif : ce mode spécial de charge n'est pas développé ici.

à volonté des séries longues et des séries courtes d'étincelles jaillissant à intervalles réguliers, entre les boules de l'éclateur.

Toutes les fois qu'une étincelle jaillit entre les boules de l'éclateur, la circulation des courants alternatifs de la décharge dans la spirale L du transformateur qui appartient au circuit fermé, fait naître des courants oscillatoires induits dans la spirale associée L' de l'antenne A d'émission Les courants oscillatoires de 'antenne sont moins amortis que dans l'excitation directe parce qu'ils n'ont plus à surmonter une résistance d'étincelle. Les *oscillations d'émission*, devenues *plus nombreuses*, provoquent, dans l'antenne de réception, un plus grand nombre d'oscillations que dans l'excitation directe.

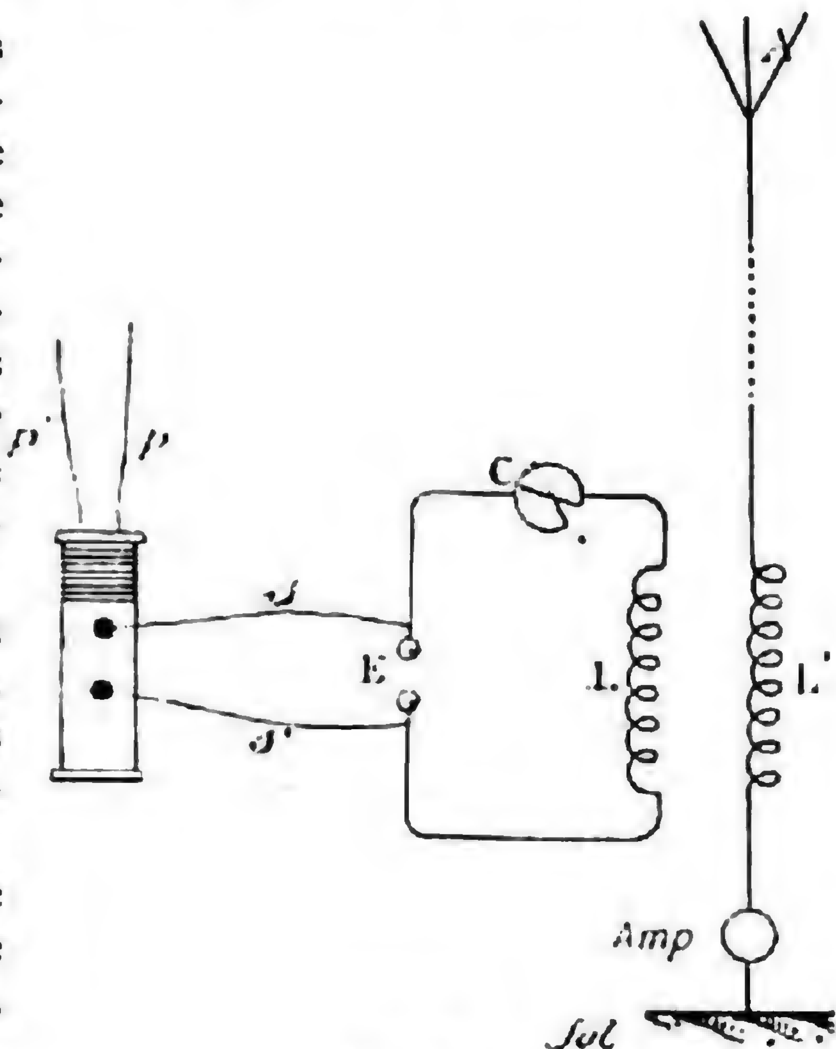


FIG. 46.

L'antenne de réception A' (fig. 47) est, de son côté, débarrassée de la résistance du contact imparfait, qui se

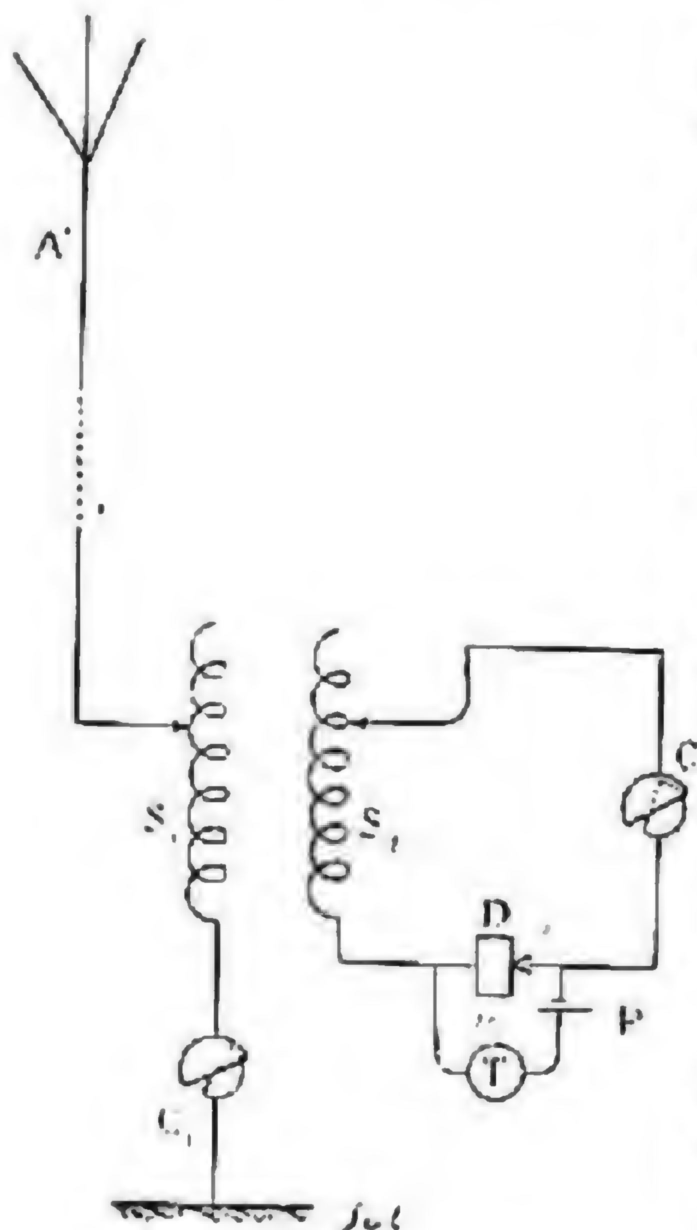


FIG. 47.

trouve maintenant dans le circuit fermé associé. Les oscillations qui y sont induites *s'amortissent* donc *moins vite* qu'avec l'excitation directe.

En dernier lieu, l'induction qui s'exerce entre les spirales associées S_1 et S_2, développe, dans le circuit fermé S_1 D C_2', des oscillations que le *contact imparfait* D redresse. Chaque train fait parler le téléphone T, comme dans l'excitation directe.

Dans l'excitation directe, on n'établissait qu'un seul accord : il se rapportait aux deux antennes. L'excitation indirecte en demande trois. Le circuit producteur d'étincelles est accordé avec le circuit de son antenne. Comme dans l'excitation

1. Les trois pointes qui terminent les antennes dans les figures 46 et 47 signalent l'emploi d'antennes multifilaires. D'autre part, si la figure 47 est la seule qui présente des condensateurs variables et des self-inductions variables, leur omission pour les autres circuits radiotélégraphiques a eu pour objet de simplifier les figures. En ajoutant des spires dans l'antenne, un frotteur mobile peut augmenter la longueur d'ondulation de l'antenne. Une capacité ajoutée à la base de l'antenne diminue la longueur d'ondulation. Tous les accords des circuits oscillants s'établissent par le réglage de selfs-inductions et de capacités.

directe, l'antenne de réception doit être accordée avec l'antenne d'émission. Enfin, l'antenne de réception et le circuit fermé du contact imparfait sont accordés entre eux[1].

DÉDOUBLEMENT DE LA RADIATION D'ÉMISSION

Le premier accord est réalisé en donnant séparément la même période au circuit inducteur fermé et au circuit de l'antenne radiante ; mais, après ces accords, il survient une complication, lorsqu'on met en liaison étroite les spirales des deux circuits associés.

Si l'on a *serré* cette liaison ou ce *couplage* afin que les oscillations de l'antenne d'émission reçoivent du circuit excitateur une énergie qui accroisse suffisamment leur amplitude, le circuit excitateur et l'antenne ne prennent pas, au moment d'une décharge, le même mouvement oscillatoire. L'antenne présente *deux* oscillations de périodes *peu différentes*, qui comprennent entre elles la période commune primitivement imposée séparément à chacun des deux circuits oscillants avant leur rapprochement.

Il résulte de la composition de ces deux oscillations des alternatives régulières de maxima et de minima d'amplitudes, comparables aux *battements* en acoustique.

Le circuit excitateur est parcouru par les mêmes oscillations que le circuit de l'antenne, mais les maxima qui résultent de la composition des deux oscillations ont lieu

1. Pour achever d'établir l'accord, on fait tourner avec un bouton moleté l'une des plaques du condensateur variable C, jusqu'à entendre les signaux avec le maximum de netteté.

dans l'un des deux circuits au même instant que les minima dans l'autre (fig. 48).

Un semblable effet se produit pour tout groupe de deux systèmes oscillants de même nature, pesants, sonores ou autres, lorsque les deux systèmes ont été accordés séparément sur une même période et rapprochés ensuite en liaison serrée. Il provient de ce qu'une forte action exercée par une partie sur l'autre en vertu de leur liaison, est suivie d'une forte réaction de l'autre sur la première.

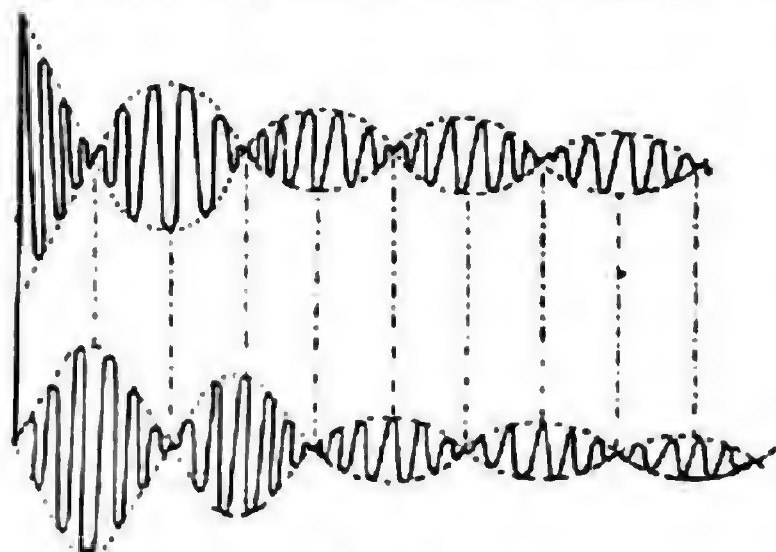


Fig. 48.

Deux radiations de périodes différentes étant ainsi rayonnées par l'antenne d'émission, il n'est possible d'accorder l'antenne de réception que sur l'une ou sur l'autre ; l'énergie de celle qui n'est pas choisie est inutilisée. Les périodes seraient peu différentes pour un couplage suffisamment lâche, mais, dans ce cas, l'antenne ne recevrait plus que peu d'énergie et sa radiation serait fort amoindrie.

D'après ce qui précède, ayant fait en sorte que le circuit ouvert de l'antenne de réception et le circuit fermé du détecteur aient séparément pour période la période d'émission choisie, on associe en *couplage lâche* les deux circuits du poste de réception, afin qu'après leur liaison ils restent d'accord sur la même période.

Longueur d'onde d'émission.

L'augmentation de l'énergie des décharges de l'éclateur a exigé un accroissement de la capacité du condensateur ; il en est résulté un notable accroissement de la période des oscillations de l'émission et par conséquent de leur longueur d'onde.

Les quantités considérables d'énergie que réclame un rayonnement électrique de longue portée ont fait donner aux antennes radiantes une grande capacité et une grande surface ; ces conditions de forte émission correspondent aussi à de grandes longueurs d'onde. Les *grandes longueurs d'onde* se prêtent d'ailleurs très bien aux transmissions radiotélégraphiques et elles ont encore l'avantage de permettre au rayonnement de *contourner* plus aisément *les obstacles* rencontrés entre les postes.

FORMES DES ANTENNES

L'organe rayonnant et l'organe collecteur sont des fils conducteurs appelés *antennes*. Primitivement, une antenne était un fil de cuivre nu, dressé *verticalement*. La forme a été modifiée pour accroître l'énergie émise et la longueur d'onde, mais le nom d'antenne a été conservé.

Une antenne formée d'un fil unique vertical a une portée qui croît avec sa hauteur[1]. Une antenne met en oscilla-

1. La longueur d'onde d'une antenne unifilaire verticale est égale à quatre fois sa longueur. La hauteur étant pratiquement limitée, on augmente la longueur d'onde en enroulant en spirale une partie de l'antenne qui aboutit à la boule supérieure de l'éclateur. Quelques spires accroissent notablement la self-induction L de l'antenne et par conséquent la période.

tion une plus grande masse d'éther si elle comprend plusieurs fils distincts. Son rayonnement augmente avec la longueur et l'écartement des fils. La forme des antennes *multifilaires* varie surtout avec la nature des supports dont on peut disposer.

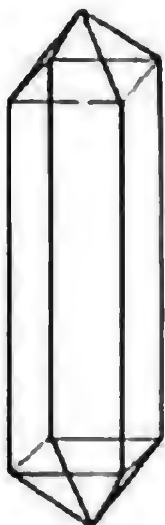


Fig. 49.

L'*antenne prismatique* (fig. 49) comprend quatre fils égaux et parallèles, écartés les uns des autres. La longueur d'onde de l'antenne est plus grande que quatre fois la longueur de l'un des fils. Le support unique peut être un mât de navire.

L'*antenne en nappe* (fig. 50) consiste en fils disposés dans un même plan, dirigés vers le poste et réunis à leur partie inférieure. Elle a deux supports isolants.

L'*antenne en pyramide renversée* (fig. 51) est un vaste entonnoir en fils métalliques qui convergent en une pointe dirigée en bas ; l'ensemble des fils est tendu sur les côtés d'un quadrilatère compris entre les sommets de quatre supports qui peuvent être très hauts.

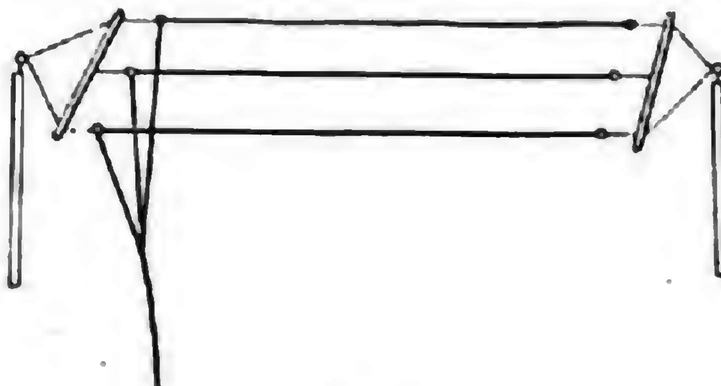


Fig. 50.

L'*antenne en parapluie* est portée par une tour unique (fig. 52) isolée électriquement du sol. Des câbles partent du sommet en divergeant et sont fixés au sol par des cordes isolantes.

Le type d'antenne adopté pour les postes de grandes

puissances réalisant des portées de plusieurs milliers de kilomètres est une *nappe horizontale* soutenue par des pylones très élevés. Une antenne doit être soigneusement isolée des mâts ou des pylones qui la supportent.

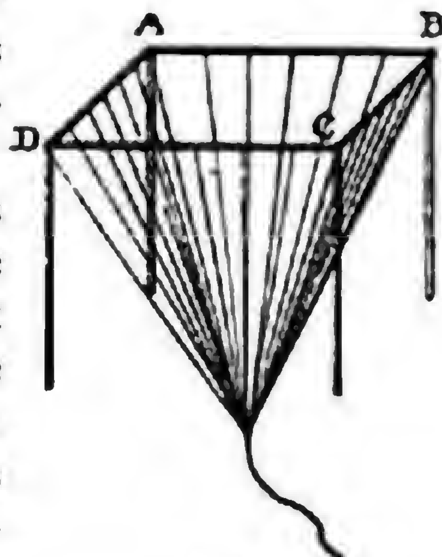
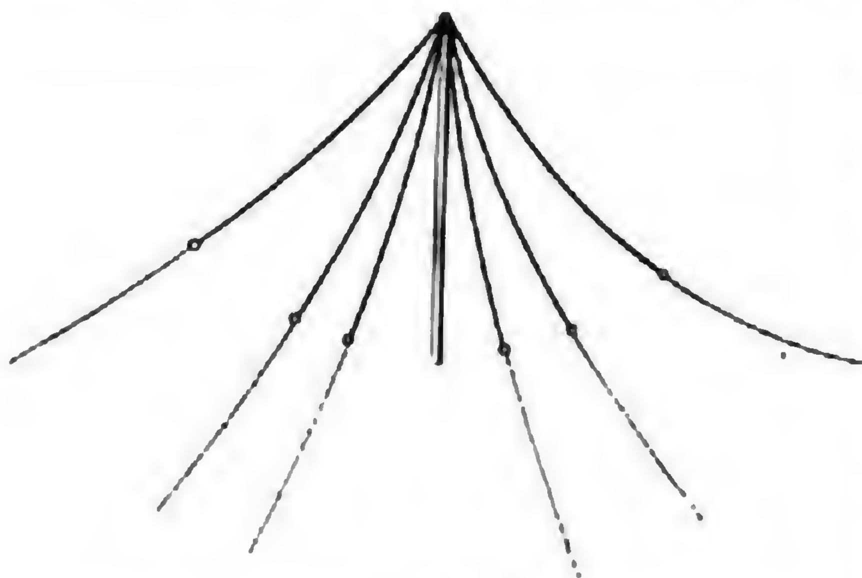


Fig. 51.

Les lignes télégraphiques, les lignes téléphoniques, les lignes de transmission de courants peuvent servir d'antennes. Il en est de même d'un fil conducteur quelconque, qui est isolé à une de ses extrémités et communique à son autre extrémité avec un appareil émetteur ou récepteur.

La *prise de terre* de l'éclateur s'établit par un réseau de conducteurs métalliques enterrés dans le sol et couvrant une *grande surface*. La profondeur à laquelle les courants s'engagent varie avec la nature du sol ; la propagation est notablement meilleure sur mer que sur terre.


Fig. 52.

Une *antenne de réception* est moins sensible aux décharges atmosphériques si elle a une petite hauteur.

Elle doit toutefois s'élever au-dessus des masses métalliques qui l'environnent et n'avoir avec elles aucune communication.

Sur *les navires de l'air*, le sol ne peut être relié à l'antenne ; on lui substitue, sous le nom de *contrepoids électrique*, la masse métallique de l'appareil. Le fil métallique de l'antenne est tendu à son extrémité libre par un poids ; il est enroulé au repos sur un rouet isolant, on le déroule plus ou moins pour établir un accord avec différents postes. Il s'incline pendant le vol.

EXCITATION INDIRECTE AVEC CHOC

L'excitation indirecte avait été un grand progrès. En premier lieu, l'*énergie* mise en action était *considérablement accrue*. En second lieu, puisqu'il faut un nombre suffisant de mouvements oscillatoires consécutifs pour établir une résonance, la *réduction de l'amortissement* avait été avantageuse. Mais, la simplicité d'une période unique avait été perdue.

Tout en conservant l'excitation indirecte et les ressources qu'elle procure pour l'accroissement de l'énergie et l'accroissement de la longueur d'onde, on a pu revenir à une période unique, comme en excitation directe (ce qui évite les doubles ondes d'émission), et obtenir, en même temps, à l'éclatement de chaque étincelle, un nombre d'oscillations beaucoup plus grand que dans l'excitation indirecte ordinaire. Ces résultats ont été atteints en rendant, *après une très brève excitation, l'antenne d'émission indépendante* de son circuit excitateur.

Par l'emploi d'un éclateur à très petite distance explosive

et à durée d'étincelle très faible, on est arrivé à ne laisser subsister, à peu près, que la première des oscillations que provoque dans le circuit excitateur chacune des étincelles de l'éclateur (fig. 53 ; courbe sup.). Il est vrai que l'énergie totale, qui est communiquée à l'antenne d'émission se trouve alors limitée à celle que fournit le début de l'excitation, mais on est parvenu à obtenir un rendement suffisant, en maintenant, entre le circuit excitateur et le circuit radiateur, une liaison serrée. Dans ces conditions, au moment où l'excitation exercée sur l'antenne disparait, le circuit excitateur peut lui avoir déjà cédé une partie importante de l'énergie de la décharge.

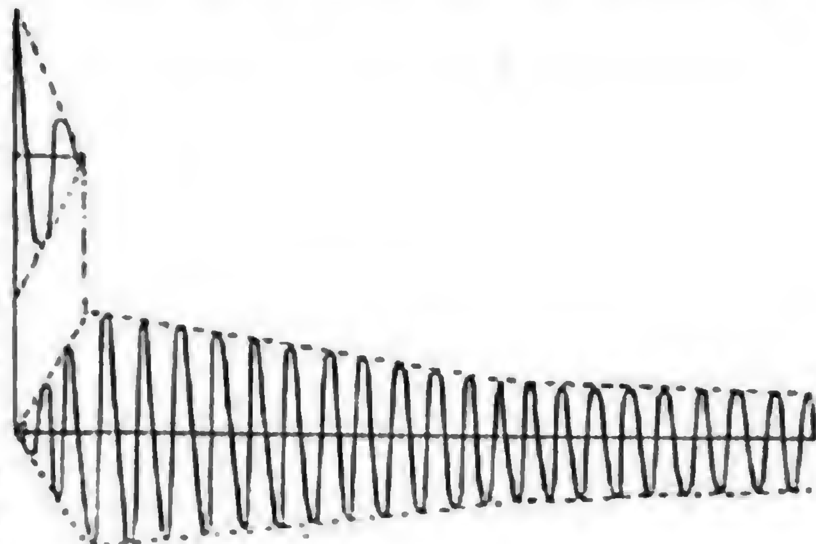


Fig. 53.

Vu la durée extrêmement courte de l'excitation, la force agissante exerce l'effet d'un *choc*. On sait qu'alors le circuit de l'antenne d'émission entre *librement* en oscillation électrique, avec sa période propre et avec son amortissement propre. Les oscillations de l'antenne ont donc ici une période unique, et elles sont d'ailleurs peu amorties, puisque l'antenne ne possède plus l'éclateur. Les oscillations se succèdent, jusqu'au moment où toute l'énergie communiquée à l'antenne par le circuit excitateur a été dissipée. Un train de ces oscillations d'émission comprend

ainsi un grand nombre d'oscillations (fig. 53 ; courbe inférieure).

D'autre part, le contact imparfait reste séparé de l'antenne de réception, et n'y amortit plus par sa résistance les oscillations induites que provoque l'antenne d'émission à travers l'espace entre les deux antennes. Bien entendu, l'antenne d'émission et l'antenne de réception ont été *préalablement accordées*. Comme précédemment, le circuit fermé de réception est accordé avec le circuit ouvert de son antenne et il lui est associé par un couplage lâche. Ces deux circuits ont ainsi une période commune, qui est celle de l'antenne d'émission. En raison du redressement produit par le contact imparfait, la membrane du téléphone fait entendre un choc pour chaque train.

Eclateurs tournants.

Pour réaliser les conditions de l'excitation par choc on fait souvent usage d'un éclateur tournant. Un disque circulaire, qui tourne autour d'un axe central perpendiculaire à son plan, porte sur sa périphérie une suite de saillies équidistantes. La circonférence des saillies passe devant une électrode fixe de l'éclateur et chacune des saillies devient à son tour la seconde électrode. Une étincelle éclate au passage de chaque saillie. L'intervalle de succession des étincelles, invariable si le moteur qui fait tourner le disque est régulier, est extrêmement réduit par une très grande vitesse de rotation. La faible distance des saillies à l'électrode fixe rend la *distance explosive fort petite*, ou l'étincelle fort courte.

Quelquefois, c'est entre deux disques D_1 et D_2, per-

pendiculaires à son plan, que tourne le disque D porteur des saillies. Un petit mouvement continu de rotation est communiqué aux disques D_1 et D_2 eux-mêmes, afin que les étincelles éclatent constamment entre des masses froides (fig. 54).

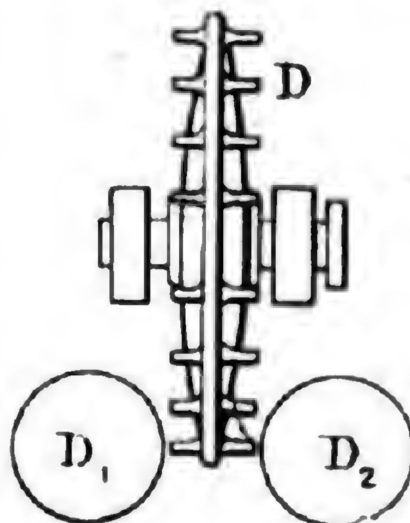


FIG. 54.

Il s'agit ici de très grandes longueurs d'onde, et par conséquent, de périodes d'oscillation notablement plus grandes que celles des petits postes ; c'est pourquoi, avec une assez grande vitesse de rotation du disque D, l'étincelle, très brusquement coupée, réduit la décharge oscillante à une ou deux oscillations.

Les trains d'oscillations des étincelles d'émission sont, dans l'excitation indirecte avec choc, beaucoup moins amortis que dans l'excitation indirecte ordinaire. Malgré cela, chaque train reste séparé du suivant par un intervalle de temps qui est encore considérable par rapport à sa propre durée et l'ébranlement oscillatoire qu'il produit sur l'antenne réceptrice peut être dissipé quand l'ébranlement suivant se présente. C'est donc *principalement* par les oscillations d'un même train que la résonance s'établit entre les deux antennes ; *elle se répète pour chacun des trains successifs.*

Etincelles fréquentes ou musicales.

Avec les anciens dispositifs, la fréquence des étincelles d'émission ne dépassait pas une centaine ; l'éclateur

tournant en donne de 1.000 à 1.500 par seconde. Cette émission est à *étincelles fréquentes*, par opposition avec l'autre, dite à *étincelles rares*.

Une grande fréquence d'étincelles est précieuse sous certains rapports. Le nombre des trains dans le circuit du contact redresseur, et, par conséquent, aussi le nombre des chocs au téléphone est égal au nombre des étincelles qui correspondent à l'envoi d'un signal : point ou trait. Or, si courte que soit au poste d'émission la durée d'une fermeture du manipulateur, elle comprend, avec les étincelles fréquentes, un nombre suffisant d'étincelles pour que tout signal, même très court, reçu au téléphone, au lieu d'être saccadé comme avec les étincelles rares, ait la note de la fréquence des étincelles. Avec un éclateur tournant bien réglé, la hauteur du son conserve une grande fixité. Les étincelles sont, dans ces conditions, qualifiées *étincelles musicales*. Dans le cas où la source électrique de charge est continue, pour N tours du disque par seconde et un nombre p de dents, la fréquence des étincelles est égale à pN.

Une différence dans cette fréquence fait varier la note des sons au téléphone et renseigne sur la *provenance* des dépêches. Lorsque deux transmissions indépendantes se font sur une même longueur d'ondulation, leur réception peut être sans inconvénient simultanée. En effet, on s'habitue assez vite, si la note musicale diffère suivant le poste, à n'entendre, à la lecture au son, que les signaux de la note avec laquelle on doit rester en correspondance.

Les étincelles musicales sont, d'autre part, avantageuses au point de vue de l'*élimination des sons parasites*. Il est utile d'y insister. La résonance ne sert pas seulement à augmenter la portée des communications, mais aussi

à obtenir la syntonisation. Si une bonne syntonisation facilite une correspondance exclusive entre deux postes, en la débarrassant d'émissions faites sur des longueurs d'onde différentes de la longueur d'onde adoptée, elle ne supprime pas les sons parasites, qui sont quelquefois extrêmement gênants. Mais comme les sons parasites proviennent de décharges atmosphériques, comme ils ont lieu par chocs isolés et ne sont que des *bruits sans caractère musical*, il est souvent possible de les négliger dans une réception à étincelles musicales, au moins lorsqu'ils ne sont ni trop forts ni trop nombreux.

Les étincelles fréquentes permettent aussi d'élever le *rendement* d'un poste. Le nombre des signaux d'un poste d'émission peut, en effet, être accru avec le nombre des étincelles par seconde, puisqu'un signal, même fort court, comprendra encore quelques étincelles.

On parvient à accroître le nombre des signaux avec des appareils d'émission à grande vitesse, mais il est important de ne pas oublier qu'un grand accroissement de la fréquence des décharges, pour un grand trafic, exige un important *renforcement de l'énergie* du circuit excitateur de l'appareil d'émission.

ACCROISSEMENT DE LA VITESSE DE TRANSMISSION

Afin d'obtenir la rapidité de transmission que réclame une grande station radiotélégraphique, il a fallu, d'une part, accélérer l'émission et, d'autre part, user à la réception de procédés spéciaux pour séparer des signaux qui se suivent à intervalles très rapprochés,

Mécanisme d'émission.

Comme cela se fait pour les grands cables sous-marins, les dépêches à expédier sont inscrites à l'avance, *par perforation*, sur une bande de papier qui passe, à cet effet, sous les touches d'un clavier alphabétique. Abaissée à la main, une touche compose en une seule frappe les signes de sa lettre. Un trou de très petit diamètre correspond à un point, un trou plus grand à un trait. Convenablement perforée, la bande de papier peut être ensuite, pour l'émission, *déroulée rapidement* par un transmetteur automatique entre deux cylindres conducteurs quo chaque trou de perforation met en contact pour laisser passer le courant d'émission ; le passage a une durée plus longue pour un trait que pour un point. L'expédition est ainsi effectuée à grande vitesse.

Réception par enregistrement.

Comme la réception au son est pénible, puisque le lecteur au son doit conserver en permanence son récepteur appliqué contre l'oreille, la recherche de l'enregistrement des signaux avait été l'objet de nombreux essais.

Dans le cas d'une réception à grande vitesse, le nombre des signaux reçus par minute est d'ailleurs trop grand pour qu'un lecteur au son puisse les suivre et l'enregistrement devient indispensable. Il s'est fait en particulier par la photographie ou à l'aide d'un phonographe.

Méthode photographique. — On emploie habituellement un galvanomètre extrêmement sensible, à indications instantanées. C'est, par exemple, un galvanomètre, dit *à corde*, dans lequel un fil conducteur très fin est tendu

entre les pôles très rapprochés d'un puissant aimant. Si l'on fait traverser ce fil par les courants redressés successifs qui mettaient en vibration la membrane du téléphone dans la réception ordinaire, l'action magnétique de l'aimant écarte brusquement le fil de sa position d'équilibre au passage de chaque train. En raison de sa très faible inertie, le fil revient à son équilibre entre deux trains.

Le fil conducteur étant éclairé par un faisceau lumineux, l'image qu'une lentille en donne se projette sur une pellicule photographique déroulée rapidement, parallèlement au fil. A chaque train d'oscillations correspond un intervalle qui provient d'un déplacement du fil entre deux de ses positions consécutives d'équilibre. Dans ces conditions, les signaux sont vus *en clair*.

Méthode phonographique. — La membrane du téléphone récepteur est disposée devant le cornet d'un phonographe. Ce cornet porte un diaphragme enregistreur muni d'une pointe aiguë qui appuie sur un cylindre de cire tournant autour de son axe. A chaque train, la vibration de la membrane du téléphone se transmet au diaphragme enregistreur et sa pointe perce dans la cire des trous dont le nombre par signal est proportionnel à la fréquence du son qui serait entendu au téléphone. Il y aura, par exemple, vingt trous pour un point et soixante pour un trait. Pour une même fréquence, l'écart de deux trous consécutifs augmente avec la vitesse de rotation du cylindre du phonographe.

Quand on veut reproduire une dépêche inscrite, on substitue au diaphragme enregistreur du cornet un diaphragme répétiteur, à pointe mousse ; puis on donne au cylindre du phonographe la vitesse de déroulement qui convient à un régime normal de lecture au son.

RÉSULTATS DE LA TÉLÉGRAPHIE PAR ÉTINCELLES

Disposant d'un révélateur d'ondes électriques suffisamment sensible, la télégraphie sans fil a trouvé, à ses débuts, dans les étincelles de décharges de condensateurs, des sources d'oscillations périodiques de haute fréquence et l'emploi de ces étincelles a conduit à la réalisation d'un procédé de communication entre deux postes qui n'ont entre eux aucune liaison apparente. Cette organisation de la télégraphie par étincelles, ou par *ondes intermittentes* qui étaient plus ou moins *amorties*, a présenté trois étapes.

La première étape, à excitation directe, offre une installation fort simple, avec ses deux antennes verticales dont l'une comprend l'éclateur et l'autre le contact imparfait. Vu la faible capacité électrique du conducteur déchargé, la portée est médiocre comme l'énergie dépensée. La longueur d'ondulation est unique et aisément connue, mais un trop fort amortissement s'oppose à toute résonance, alors même que les deux postes ont été accordés ; et les divers groupes de postes ne restent pas indépendants les uns des autres.

Dans une *deuxième étape*, l'excitation est indirecte ; à l'émission, comme à la réception, une antenne est associée à un circuit fermé. Les antennes se sont étendues en hauteur et en surface ; la longueur d'onde a grandi ; la portée est devenue considérable, ainsi que l'énergie dépensée. Mais une liaison très accentuée de l'antenne

d'émission et de son circuit d'excitation a imposé deux longueurs d'onde, entre lesquelles il faut choisir. La résonance reste fort incomplète, et, pour cette raison, les divers postes ne sont pas suffisamment indépendants. Les signaux parasites se montrent, aussi bien que dans la première étape, fort gênants.

La *troisième étape* apporte des avantages importants. L'excitation est encore indirecte, mais par des artifices bien étudiés, elle agit par choc sur l'antenne d'émission. On se trouve, alors, ramené à une onde d'émission unique et à une oscillation libre de l'antenne de réception, comme dans la première étape. L'amortissement est très réduit dans chacune des antennes, et la résonance est notablement améliorée. Les étincelles musicales font distinguer les différents postes ; en outre, surtout si on les choisit à sons aigus, elles permettent de négliger plus aisément les bruits *parasites*.

En résumé, après avoir augmenté graduellement, considérablement, la puissance des décharges de condensateur à l'émission, après avoir développé avec beaucoup d'ampleur la surface rayonnante et absorbante des antennes, on avait réussi à franchir de très grandes distances sur la surface du globe, par télégraphie sans fil, directement, sans appareil intermédiaire.

Cependant, de nouveaux progrès étaient encore attendus. Une *correspondance exclusive* entre deux postes n'était pas suffisamment obtenue. Même avec des étincelles agissant par choc, en excitation indirecte, un train d'oscillations de l'antenne d'émission s'amortissait trop vite pour laisser s'établir une *résonance parfaite*. Il valait mieux qu'au lieu d'être mise en oscillations par saccades, l'antenne d'émission fût maintenue en *oscillations*

entretenues, à amplitude constante, désormais sans éclateur et sans étincelles.

La longueur d'onde restant entretenue et constante, on peut profiter de toutes les ressources que procure l'utilisation de la résonance, pour accorder d'une façon parfaite le circuit émetteur et le circuit récepteur.

Avec les ondes entretenues, l'énergie dépensée, étant uniformément répartie sur tout le temps du fonctionnement de la source, l'énergie consacrée à un signal est, à puissance moyenne égale, moindre qu'avec l'emploi d'éclatements d'étincelles.

Il est utile de faire remarquer que les ondes amorties sont reçues plus simplement que les ondes entretenues; on verra, en effet, que les ondes entretenues exigent des appareils auxiliaires de réception (soit tikker, soit hétérodyne). Mais ce sont les très grands avantages de la résonance qui font préférer les ondes entretenues.

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL PAR ONDES ENTRETENUES

Un rayonnement à ondes entretenues peut provenir d'une machine à courants alternatifs de haute fréquence. Dans une excitation directe, un des pôles de la machine est relié à une antenne d'émission, tandis que l'autre pôle communique avec la terre. Il n'y a plus ni éclateur ni étincelles. Le poste de réception peut être installé comme celui de la télégraphie par étincelles.

La vitesse de rotation de la machine à courants alternatifs restant constante, la période du courant d'émission et sa longueur d'onde ne varient pas. Avec un manipulateur interposé entre l'antenne d'émission et le pôle de la machine qui est relié à cette antenne, des oscillations sont débitées régulièrement le long de l'antenne. Mais la source d'oscillations entretenues ne fournit pas elle-même, comme un appareil à décharges intermittentes, des trains d'oscillations espacés dont le nombre est plus grand pour un trait que pour un point ; la continuité des oscillations maintient, à la réception, après redressement par un contact imparfait, la plaque du téléphone attirée pendant toute la durée d'une fermeture du manipulateur. Rien ne distingue plus alors, au son, une fermeture courte d'une fermeture plus longue. Dans ces conditions, pour obtenir des signaux brefs ou longs, on a dû superposer une fréquence auxiliaire à la haute fréquence du courant oscillatoire de la source.

TIKKER

Un premier procédé a consisté à interrompre automatiquement le courant oscillatoire à des intervalles très rapprochés et à laisser seulement passer, dans la suite des oscillations entretenues, des *tranches égales*, équidistantes, en nombre de 800 à 1.000 par seconde. Deux tranches consécutives sont alors assez écartées l'une de l'autre pour que, dans leur intervalle, la membrane du téléphone revienne à sa position d'équilibre. L'interrupteur vibrateur, appelé *tikker*, est placé, par exemple, dans le circuit du contact redresseur et du téléphone.

Dans ces conditions, si le manipulateur d'émission restait constamment ouvert, aucun courant ne circulant dans le circuit récepteur, le téléphone ne parlerait pas. Si le manipulateur restait constamment fermé, le contact imparfait de réception redresserait les courants successifs des tranches et le téléphone ferait entendre une succession de chocs équidistants, donnant la note de la fréquence de l'interrupteur automatique. Quand le manipulateur est fermé pendant un temps plus ou moins long, les tranches découpées des oscillations produisent sur le téléphone, pendant chaque fermeture, une action semblable à celle des trains d'oscillations d'une transmission par étincelles séparées. Conformément à la durée du débit que commande le manipulateur, le nombre des chocs au téléphone fait distinguer un trait d'un point. L'énergie que l'antenne d'émission reçoit de la machine à ondes entretenues, dans l'intervalle de deux tranches consécutives, est ici complètement perdue et reste inutilisée.

HÉTÉRODYNE

On préfère superposer une autre fréquence à la fréquence de la source en installant, au voisinage de l'antenne de réception, un circuit oscillant qui est une source spéciale d'oscillations entretenues, dite *hétérodyne* ; cette source émet des oscillations de haute fréquence, dont l'opérateur règle l'amplitude et la période. Si l'on a amené l'amplitude et la période de ces oscillations auxiliaires à être voisines de l'amplitude et de la période des oscillations induites de l'antenne de réception, il y a, pendant chaque fermeture du manipulateur, superposition, dans l'antenne de réception, d'oscillations induites à grande distance dues au poste d'émission et d'oscillations induites à petite distance dues à l'hétérodyne. Ces deux groupes d'oscillations ne sont ni l'un ni l'autre reconnus séparément, mais le résultat de leur superposition produit des *battements* perceptibles. (fig. 55).

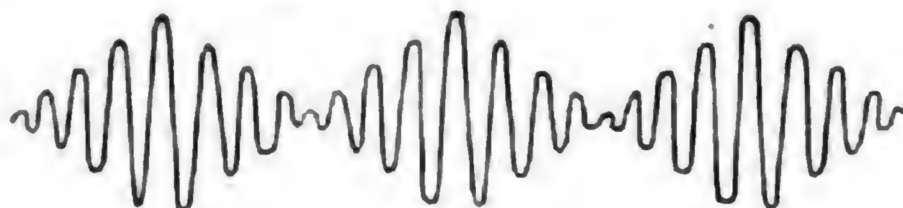


FIG. 55.

En effet, sur les nombreuses oscillations qui proviennent de deux mouvements oscillatoires distincts, l'un de fréquence n, l'autre de fréquence n', d'amplitudes peu différentes, il y a, si n et n' sont assez voisins, des renforcements et des affaiblissements périodiques de fréquence

$n - n'$[1] (fig. 55). Pour une différence de 500 oscillations par seconde entre les deux groupes d'oscillations qui sont induites dans l'antenne de réception, une note de fréquence 500 est entendue au téléphone tant que le débit se poursuit à manipulateur fermé. C'est, avec cette note des renforcements, que les fermetures du manipulateur, brèves ou longues, font entendre des points ou des traits. La manœuvre du manipulateur est la même que pour la télégraphie avec fil de ligne en courant continu.

L'emploi de l'hétérodyne produit à la réception une *amplification* dont l'énergie est empruntée à la source même de l'hétérodyne. L'hétérodyne associe en effet dans l'antenne de réception sa puissance propre avec celle qui vient de la source des signaux. Les oscillations de l'hétérodyne, qui vont *interférer* avec les oscillations de l'antenne de réception, doivent leur être comparables au point de vue de l'amplitude. Leur source sera donc faible par rapport à la source des oscillations entretenues qui parcourent au loin l'antenne d'émission.

Un poste récepteur à hétérodyne ne reçoit pas les signaux d'un poste émetteur à oscillations entretenues dont la longueur d'onde diffère sensiblement de la longueur d'onde de l'hétérodyne[2]. La réception par battements a donc l'avantage de produire des effets de sélection qui facilitent une correspondance exclusive entre certains postes.

1. Dans le cas de mouvements vibratoires sonores, les *battements* sont distingués par l'oreille, si $n - n'$ est suffisamment petit. Lorsque la différence $n - n'$ n'est plus très petite, l'ensemble des battements, alors très rapprochés, forme un son résultant, de fréquence $n - n'$.

2. Diverses émissions de postes éloignés pourraient donner à la réception des effets de superpositions semblables à ceux de l'hétérodyne si leurs longueurs d'onde étaient encore assez proches de n et de n', mais par son voisinage et par son réglage, l'hétérodyne produit des effets de renforcement prédominants qui mettent à l'abri des brouillages.

ONDES ENTRETENUES DES MACHINES ALTERNATIVES

Quelle machine à courants alternatifs a-t-on pu employer pour des communications par ondes entretenues ?

Dans les premières années de la télégraphie sans fil l'idée ne pouvait pas venir de substituer des courants d'alternateurs aux courants alternatifs d'extrême fréquence, produits par des décharges de condensateurs. En effet, les courants des alternateurs industriels destinés à l'éclairage et à la traction ont une fréquence comprise entre 50 et 150, alors qu'un poste radiotélégraphique à antenne rectiligne de 75 mètres ou d'une longueur d'onde de 300 mètres exige des courants alternatifs d'une fréquence égale à un million.

On ne pouvait songer à réaliser à la façon ordinaire des alternateurs d'une fréquence aussi élevée. En effet, dans la construction usuelle, en face d'un enroulement induit fixe, on fait tourner uniformément, autour d'un axe qui passe par son centre, une *couronne annulaire de pôles* d'électroaimants, alternativement nord et sud, régulièrement espacés. La période de la force électromotrice induite est le temps qui sépare les passages de deux pôles consécutifs de l'inducteur devant un même point de l'enroulement induit. La fréquence du courant, qui est l'inverse de la période, croît ainsi avec le nombre des pôles de la couronne annulaire et avec la vitesse de rotation. Le diamètre de l'anneau augmentant avec le nombre des pôles, les effets de la force centrifuge imposent des limites, soit au nombre des pôles, soit à la vitesse périphérique de rotation. L'accroissement du

nombre des pôles sur une circonférence donnée diminue d'ailleurs l'étendue de chaque pôle, la longueur des enroulements et par suite l'induction dans l'induit.

D'ingénieuses multiplications, indirectes, de la fréquence, ont, il est vrai, fait obtenir, avec des machines déjà puissantes, des oscillations entretenues dont la fréquence atteignait le nombre de 50.000.

Pour les longues portées, on avait dû, à la fois, mettre en jeu de grandes énergies et donner aux antennes une énorme capacité, exigeant des hauteurs et des surfaces considérables. La capacité des condensateurs et des antennes correspond, pour les radiations utilisées, à de très grandes longueurs d'onde. De la longueur d'onde de 6 kilomètres, adoptée pendant une dizaine d'années dans plusieurs grands postes, on est arrivé à 20. A 30 kilomètres, la fréquence tombe à 10.000. De très puissantes machines à courants alternatifs, de 10.000 vibrations par seconde sans multiplication, peuvent donc être employées dans les très grands postes.

Si l'émission par étincelles disparait pour les grands postes, ne pouvait-on pas supposer que, faute de mieux, elle se maintiendrait pour les petits ? Cela n'est plus, car, pour les postes à courte antenne, ou à petite longueur d'onde, dont la portée ne dépasse pas quelques centaines de kilomètres, un procédé nouveau, inattendu, est venu s'imposer d'emblée. Ce procédé, d'origine américaine, a *inauguré une ère nouvelle* en apportant des ressources exceptionnelles en radio télégraphie et surtout en radiotéléphonie ; il a eu pour point de départ l'introduction d'un redresseur spécial de courants alternatifs : la lampe à deux électrodes.

LAMPE A DEUX ÉLECTRODES

La lampe à deux électrodes est une lampe *à incandescence*, primitivement à filament de charbon, actuellement à filament de tungstène *f*, convertie en lampe à deux électrodes par une plaque de nickel *p* qui pénètre, comme le filament, dans le vide de l'ampoule. Cette plaque a été appelée la seconde électrode. Le filament étant maintenu *incandescent* par quelques accumulateurs, si la plaque est reliée, en dehors de l'ampoule, au *pôle positif* d'une pile P d'éléments associés en série (fig. 56) qui la maintient à un potentiel supérieur au potentiel du filament, tandis que le pôle négatif de la pile P est, en dehors de l'ampoule, relié au filament par un fil conducteur, la lampe offre une particularité spéciale, observée par Edison et dite *effet Edison*. L'intervalle vide qui sépare la plaque du filament devient *conducteur* et un faible courant, mesuré par l'ampèremètre A, va, dans l'ampoule, de la plaque au filament.

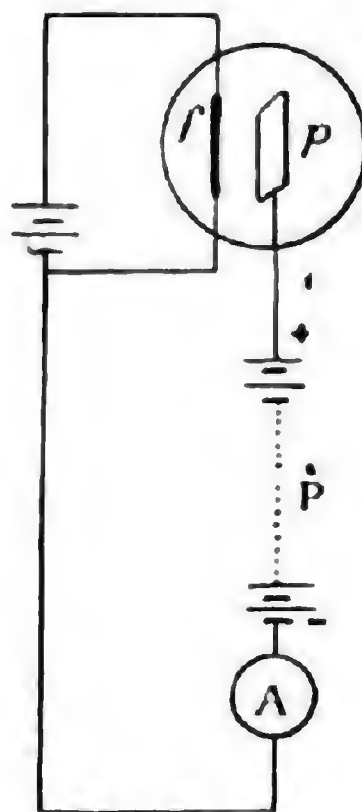


Fig. 56.

L'intensité du courant, dit courant *plaque-filament*, varie avec le nombre des éléments de la pile P et avec l'incandescence du filament. Ce courant n'apparait plus quand la lampe est éteinte ou quand le potentiel de la plaque est inférieur au potentiel du filament.

A une température donnée du filament, une même intensité du courant plaque-filament exige une charge positive de la plaque, d'autant moindre que le vide a été poussé plus loin dans l'ampoule. La charge positive de la plaque restant la même, le courant plaque-filament, pour un même degré de vide, augmente avec la température du filament. Au delà d'une certaine charge de la plaque, à une température donnée du filament, le courant plaque-filament cesse de croître [1].

Si pour la charge de la plaque, la pile est remplacée par une source à courant alternatif, l'ampoule de la lampe à deux électrodes à filament incandescent n'est traversée que par les alternances qui rendent la plaque positive. La lampe à deux électrodes a *donc* une *conductibilité unipolaire* et elle est un *redresseur* de courant alternatif, avantageusement utilisable dans certains cas.

LAMPE A TROIS ÉLECTRODES

Une remarquable et importante addition a étendu les usages de la lampe à deux électrodes, et a puissamment contribué à vulgariser la télégraphie sans fil ; c'est l'introduction, dans le vide de l'ampoule, entre le filament et la plaque, d'un conducteur formant une *troisième électrode*. La troisième électrode est souvent un cadre

1. Le filament, parcouru par le courant qui le porte à l'incandescence et qu'on appelle *courant de chauffage*, présente sur sa longueur, comme toute portion de fil conducteur que parcourt un courant électrique continu, une charge électrique qui passe régulièrement du positif au négatif entre le pôle positif et le pôle négatif de sa pile de chauffage. Il suffit que la plaque soit positive par rapport à une faible longueur du filament, pour qu'il se produise un petit courant dans le circuit plaque-filament.

métallique, parallèle à la plaque, sur lequel des fils métalliques fins sont tendus perpendiculairement à la direction du filament et parallèlement à deux côtés du cadre. Cette forme a fait donner à la troisième électrode le nom de *grille*. Quelle que soit sa forme, la troisième électrode doit offrir des *intervalles vides*, à travers lesquels la plaque positive exerce son action spéciale sur le filament.

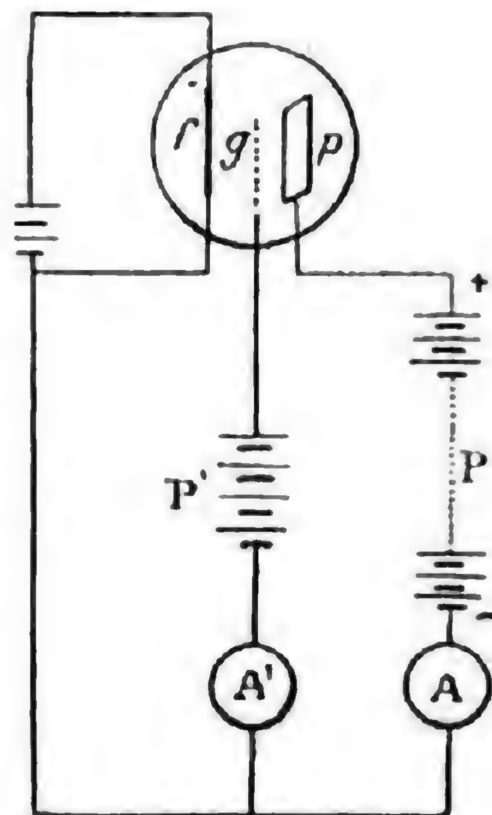


Fig. 57.

La plaque et la grille, ordinairement toutes les deux en nickel, sont des conducteurs libres dans l'ampoule ; chacune en sort par un fil conducteur, qui va au pôle négatif de la batterie de chauffage du filament. Trois circuits aboutissent ainsi à ce pôle négatif : le circuit de chauffage, le circuit plaque-filament et le circuit grille-filament [1]. La grille peut recevoir une charge électrostatique positive ou négative d'une pile P' placée sur le trajet grille-filament, de même que la plaque est chargée positivement par la pile P placée sur le trajet plaque-filament (fig. 57).

Quand la grille est chargée, comme la plaque, par un pôle *positif* de pile, l'action de la grille sur le filament

1. Si la grille est reliée à la plaque, la lampe se comporte comme une lampe deux électrodes ou comme un *redresseur* de courant alternatif.

renforce, à l'intérieur de l'ampoule, l'action de la plaque et *augmente* ainsi le *courant de plaque*. Ce même courant est, au contraire, diminué quand la grille est chargée par un pôle négatif. L'action de la troisième électrode a pour effet d'introduire ainsi une force électrique qui se compose avec la force électrique de la plaque, pour faire varier l'intensité du courant de plaque, comme le ferait un changement du nombre des éléments de la pile de plaque. La lampe à trois électrodes remplit divers rôles électriques dont le mécanisme repose sur les variations de la charge électrostatique de la troisième électrode.

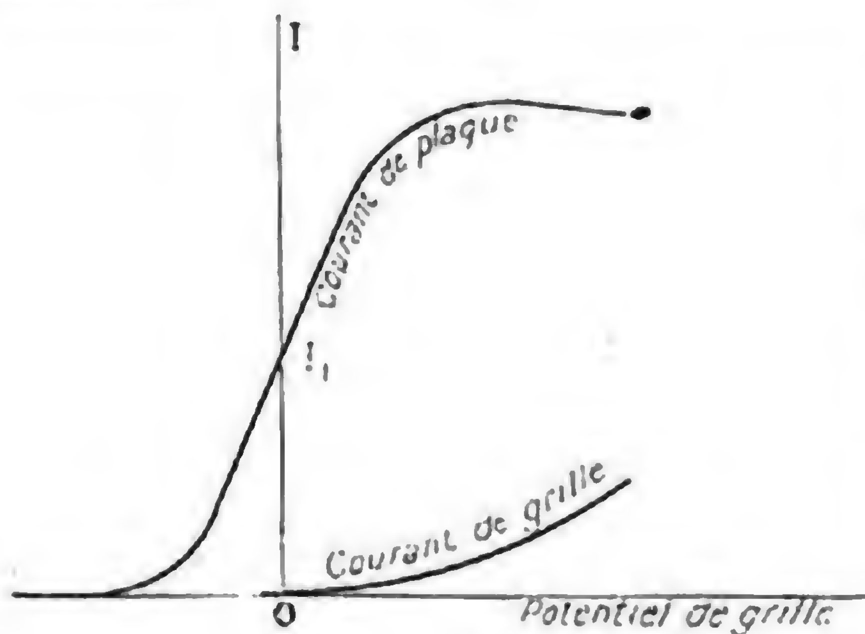


Fig. 58.

L'usage en radiotélégraphie de la lampe à trois électrodes s'appuie sur une étude préliminaire des valeurs que prend l'intensité du courant de plaque, si on augmente graduellement la charge électrostatique de la grille. La *courbe de cette intensité* change aussi avec la température du filament et avec le potentiel de la plaque. La figure 58 se rapporte à un chauffage du filament où la force électromotrice des accumulateurs est 4,5 volts. Dans le *circuit plaque-*

filament, la plaque p est reliée au pôle positif d'une pile de 150 volts.

Dans ces conditions, on a observé les valeurs des intensités du courant au milliampèremètre du circuit plaque-filament lorsque la charge de la plaque restant constante et positive, on fait varier la charge de la grille. La fig. 58 donne le tracé de la courbe des intensités de ce courant. Le potentiel de l'origine O des coordonnées est le potentiel du pôle négatif de la pile de chauffage du filament ; les abscisses sont les potentiels de la grille, qu'on a fait varier, de — 40 volts environ à + 40 volts ; les ordonnées sont les intensités correspondantes du courant plaque-filament. Cette courbe est appelée la *courbe caractéristique* de la plaque.

Lorsque le potentiel de la grille est notablement inférieur au potentiel de l'origine, il n'y a aucun courant de plaque. Le potentiel de la grille restant encore négatif, mais augmentant, il vient un moment où un courant apparaît dans le circuit plaque-filament; il augmente avec le potentiel de la grille. Quand le potentiel de la grille est devenu voisin du potentiel négatif de chauffage, un *faible* courant traverse le circuit grille-filament et son ampèremètre A, ce courant augmente quand le potentiel de la grille continue à s'élever. Le courant plaque-filament atteint un maximum et devient sensiblement constant, alors que le courant de grille ne cesse pas d'augmenter[1].

1. Dans les conditions de la fig. 58, le courant de grille est très faible, son ordonnée est tracée à une échelle plus grande que les ordonnées du courant de plaque.
Si l'on modifie les conditions du tracé de la figure 58, la courbe caractéristique de la plaque se modifie. Conservant sensiblement le même point de départ à gauche, elle a des ordonnées plus fortes sans changement sensible de forme quand on élève la température du filament.

La *caractéristique* du courant plaque-filament offre un grand intérêt pratique. Lorsque le potentiel de grille est voisin du potentiel du pôle négatif de la pile de chauffage, elle présente une portion moyenne très inclinée et rectiligne, limitée par deux petites portions courbes : l'une dans la région des courants de plaque de faible intensité, l'autre précèdant le maximum du courant de plaque.

Suivant le mode d'emploi de la lampe, il y a lieu de rechercher, soit une proportionnalité du courant de plaque au potentiel de la grille, soit une variation du courant de plaque plus rapide que la variation du potentiel de la grille. A chacun de ces besoins correspond, pour le fonctionnement de la lampe, une région de la courbe caractéristique qui assure au courant de plaque les valeurs qui lui conviennent.

Usages de la lampe à trois électrodes

La lampe à trois électrodes a été appelée à remplir *trois rôles distincts* : d'amplificateur, de détecteur-redresseur et de générateur d'ondes entretenues.

Pour ces trois rôles, la grille se prolonge, en dehors de l'ampoule, par un conducteur qui va au pôle négatif de chauffage du filament ; elle peut recevoir une charge d'une pile intercalée sur ce conducteur. En outre, le rôle auquel la lampe est appliquée fera varier la charge ou le potentiel de la grille. Pour introduire cette variation spéciale, le conducteur de communication, qui va de la grille au pôle négatif de la pile de chauffage du filament,

présente sur son trajet une *spirale*, qui communiquera à la grille une charge électrique, variable par la quantité et par le signe.

Vu la *très faible capacité* de la partie de la grille qui est libre dans l'ampoule, sa charge est notablement modifiée par une petite variation d'un courant oscillatoire qui est induit dans la spirale du circuit de grille. C'est à la très faible capacité de sa grille que la lampe à trois électrodes doit sa grande sensibilité.

ROLE D'AMPLIFICATEUR

Le courant, dont on veut amplifier l'effet, passe dans une spirale primaire S qui agit sur une spirale secondaire *s'* intercalée dans le circuit de grille[1]. Les courants de la spirale S font naître, dans la spirale *s'*, (fig. 59) des courants qui accroissent alternativement les potentiels ou les charges électrostatiques de la grille. Il est possible de se placer dans des conditions telles que de petites variations de charge de la grille, dues à des courants extraordinairement faibles, provoquent de *notables variations du courant de plaque*. Rendues ainsi plus perceptibles, les variations de la charge de la grille sont dites *amplifiées*. Les courants de plaque produisent, alors, sur un téléphone récepteur T qui fait partie du circuit de plaque, des actions importantes.

1. Pour l'amplification, le mécanisme de transmission à la grille peut varier. L'amplificateur ici décrit est dit *à transformateur*. Suivant le cas (spécialement de basse ou de haute fréquence) le transformateur que constituent les deux spirales S et S' a un noyau de fer ou n'en a pas.

On obtient la meilleure amplification, quand le potentiel de la grille est voisin du potentiel négatif de la pile de chauffage du filament. Lorsque la spirale auxiliaire S n'est parcourue par aucun courant, la spirale *s'* garde le potentiel du pôle négatif de la pile de chauffage qui a été pris pour origine. Le courant de plaque qui correspond à ce potentiel de grille est OI_1. Si la spirale S reçoit un courant à amplifier, les courants induits en *s'* communiquent à la grille des potentiels de petite valeur à droite et à gauche de O sur la ligne des abscisses. En raison de la *forte inclinaison* en I_1 de la courbe des intensités du courant de plaque (fig. 58), les valeurs du courant de plaque éprouvent des variations très importantes par rapport aux petites variations du potentiel de grille. Comme, d'autre part, la courbe caractéristique du courant de plaque est, à ce moment *rectiligne*, l'intensité du courant de plaque est proportionnelle au potentiel de la grille ; le courant amplifié n'est donc pas déformé.

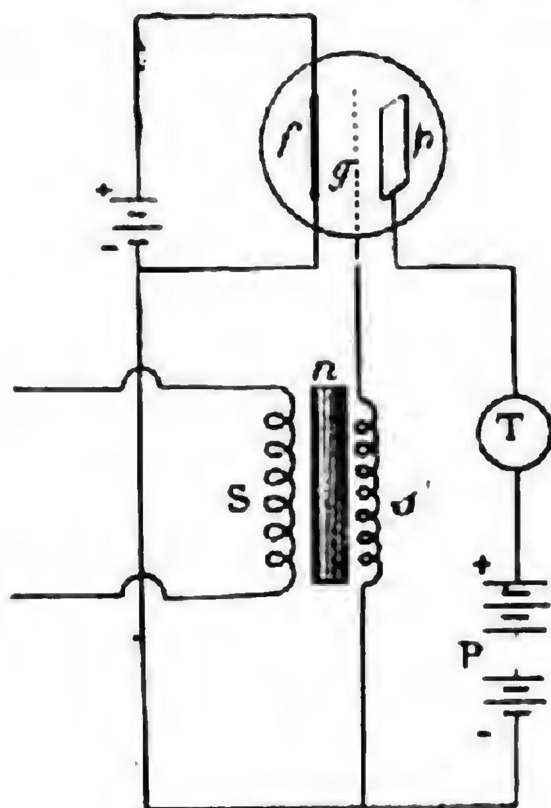


Fig. 59.

La grille a fonctionné, comme un *relais*, qui fait intervenir dans un circuit différent du sien, une énergie étrangère au phénomène étudié, empruntée au courant de plaque. La dépense d'énergie du courant de grille étant

alors insignifiante, puisque l'intensité de ce courant est presque nulle, la grille s'est comportée comme un *relais* qui obéit *sans inertie* et par conséquent sans retard.

L'amplification ne s'applique pas seulement à des signaux radiotélégraphiques et à des conversations radiotéléphoniques, mais à des signaux et à des conversations de télégraphie et de téléphonie ordinaires. Au lieu de faire agir les courants directement sur un téléphone,

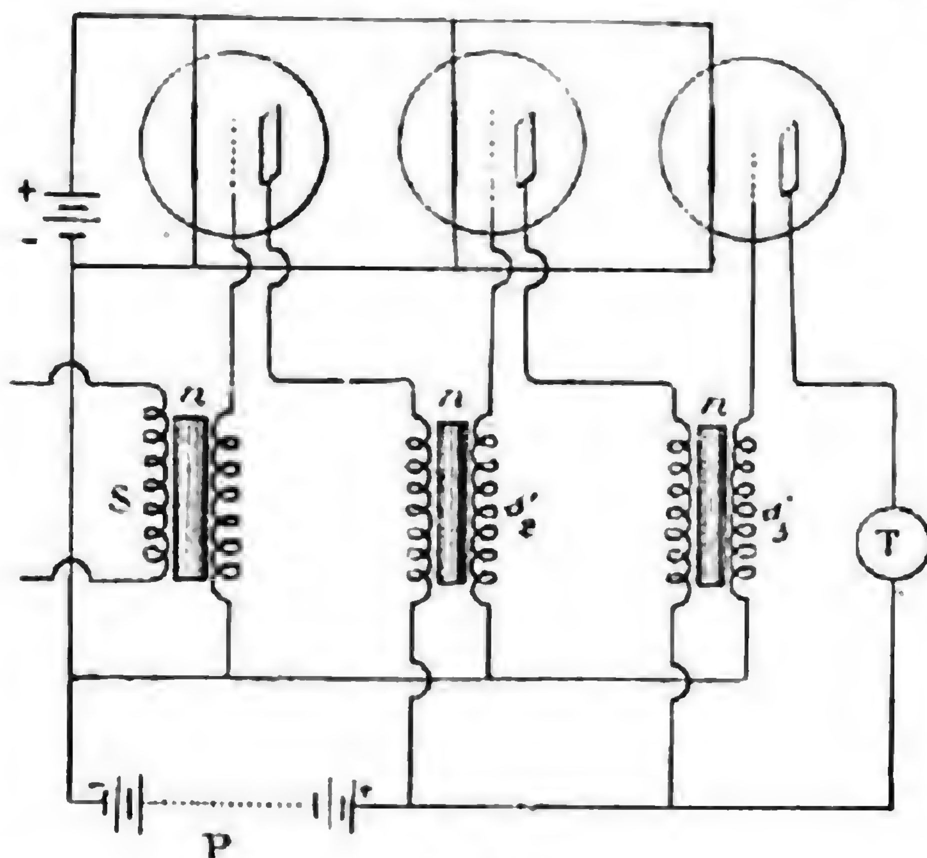


FIG. 60.

ce qui serait illusoire, puisqu'ils sont trop faibles pour exercer une action suffisante, on les a conduits dans la spirale primaire S.

Si l'amplification par une seule lampe ne suffit pas, on a recours à des amplifications successives. A cet effet, le circuit de plaque de la première lampe est prolongé par

la spirale primaire d'un nouveau transformateur, dont la spirale secondaire s'_2, est reliée à la grille d'une seconde lampe. C'est dans le circuit de plaque de cette seconde lampe que l'on place maintenant le téléphone, qui se trouvait antérieurement dans le circuit de plaque de la première lampe. De proche en proche, le nombre des lampes amplificatrices est susceptible d'être augmenté[1] (fig. 60). On a rendu, en définitive, appréciables au téléphone T des déplacements électriques qui auraient été absolument imperceptibles.

Jointe à la résonance, l'amplification recule d'une façon surprenante les limites de la réception en télégraphie.

ROLE DE DÉTECTEUR

Si pour l'*amplification*, on a utilisé la partie inclinée et rectiligne de la caractéristique de plaque, on peut pour la *détection* recourir à l'une des deux portions courbes de la même caractéristique. Les liaisons des trois circuits restent établies comme dans la fig. 57.

L'antenne A' du poste de réception est mise en liaison, par une spirale S de sa base, avec une spirale *s* du circuit de grille qui est disposée en regard. Les trains d'oscillations, provoqués dans l'antenne A', font alors naître des courants oscillatoires dans *s* (fig. 61).

L'abscisse Om (fig. 62) étant la valeur du potentiel qu'une charge constante donne à la grille, toute oscillation qui circule dans la spirale *s*, y ajoute, par ses deux alternances, deux charges électrostatiques successives, *égales*

1. La figure 60 se rapporte à l'emploi de trois lampes amplificatrices. Dans une lampe amplificatrice la différence de potentiel des deux pôles de la pile P de charge est d'environ 40 volts.

et contraires. Comme à l'ordinaire, une charge électrostatique positive de grille, résultant d'une alternance positive de la spirale *s*, renforce le courant de plaque. Pendant l'alternance suivante, l'addition à la charge de la grille étant négative, le courant de plaque est réduit.

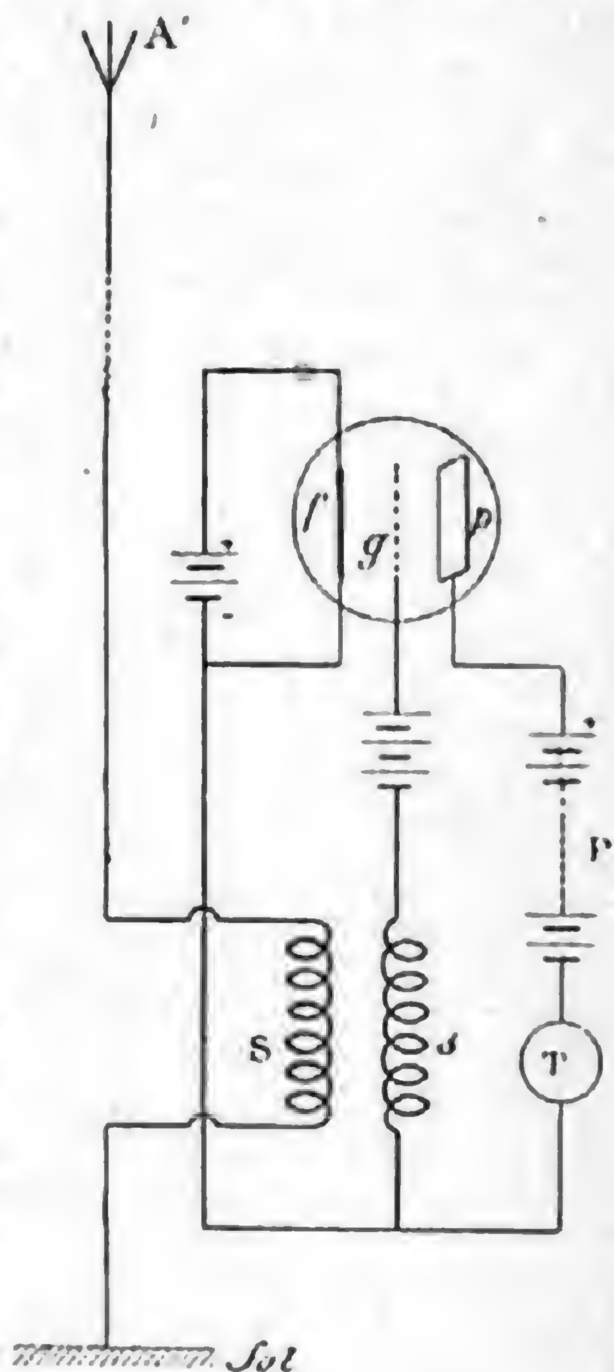


FIG. 61.

Le potentiel Om de la grille a augmenté de mm_1, par une charge positive et diminué d'une valeur égale mm_2 par la charge négative qui suit. Les intensités des courants de plaque correspondants sont M_1m_1 et M_2m_2.

Si la courbe caractéristique était rectiligne au voisinage de M, les variations des ordonnées restant égales entre l'abscisse O*m* et les abscisses extrêmes Om_1 et Om_2, le téléphone ne parlerait pas. En effet, les courants qui correspondent aux ordonnées se succèdent trop vite pour que chacun, séparément, écarte la membrane du téléphone de la position que lui donne l'intensité M*m*.

Il en est autrement, si la région d'opération sur la caractéristique de plaque a une courbure accentuée. L'augmentation M_1m_1 — Mm étant supérieure à la diminution Mm — M_2m_2, chaque oscillation donne lieu à une augmentation résiduelle du courant de plaque qui se renouvelle à chaque oscillation induite. L'ensemble des oscillations d'un *train*, engendre ainsi un courant continu, somme de courants résiduels de même sens.

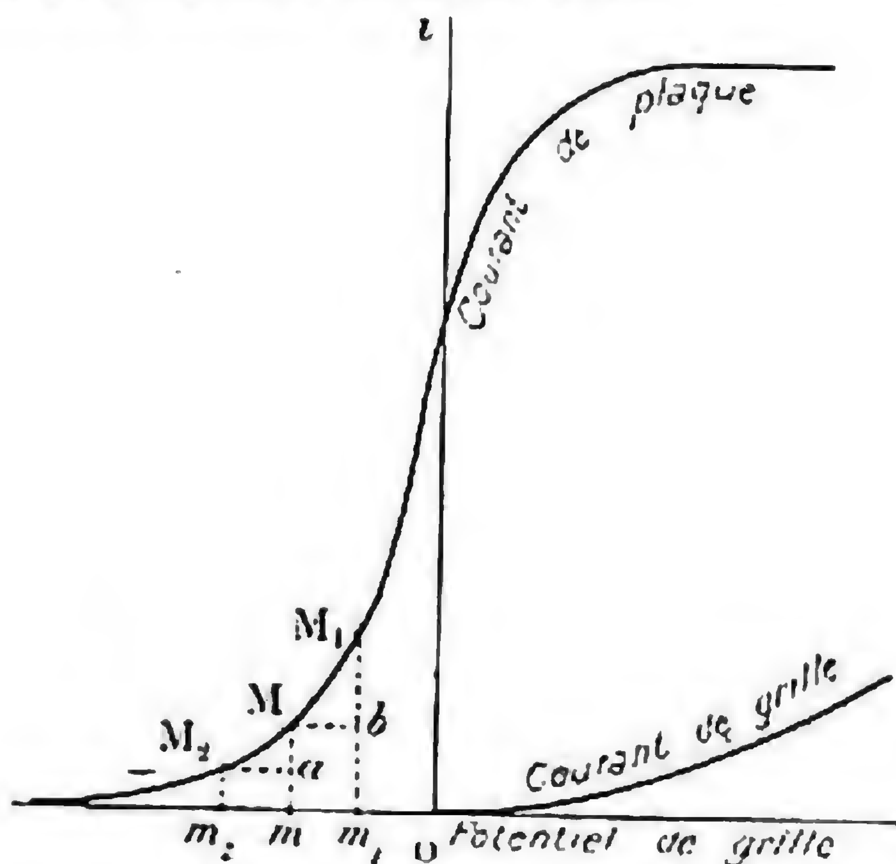


Fig. 62.

Chaque signal augmente momentanément l'intensité du courant de plaque et donne un choc au téléphone.

Pratiquement, on cherche sur une des deux courbures la position qui donne la plus forte audition des signaux.

La lampe à trois électrodes sert d'appareil détecteur dans des postes de toute puissance.

ROLE DE GÉNÉRATEUR D'ONDES ENTRETENUES

Pour les postes à grande longueur d'onde, les oscillations sont entretenues directement par une machine à courants alternatifs. Pour les postes de faible puissance et même pour les postes moyens, des oscillations sont amorcées et entretenues par une lampe à trois électrodes dans le circuit oscillant de l'antenne d'émission.

Quand une lampe à trois électrodes doit fournir des oscillations entretenues, le circuit du courant de plaque comprend une spirale S disposée à la base de l'antenne d'émission (fig. 63). Lors d'une fermeture du manipulateur M qui est intercalé dans le circuit de plaque pour produire des émissions de signaux Morse, une circulation brusque du courant de plaque[1] donne naissance à un courant de self-induction dans la spirale S. Le circuit oscillant de la base de l'antenne entre en oscillation avec sa période propre, comme un pendule qu'un choc a écarté de sa position d'équilibre. Ces oscillations diminueraient peu à peu d'amplitude à la fois par leur rayonnement quand elles parcourent l'antenne et par la chaleur que dégage leur courant.

Mais la troisième électrode peut alors servir à entretenir les oscillations de l'antenne. A cet effet, le circuit de grille comprend une spirale *s* accouplée avec la spirale S de la base de l'antenne. Aux alternances des courants induits que les oscillations de la spirale S font naître dans la spirale *s* correspondent sur la grille des charges électrostatiques alternativement de signes contraires.

1. Pour une lampe d'émission la différence de potentiel des pôles de la pile de plaque peut être très grande, et atteindre 1.000 et 1.500 volts.

Une charge électrostatique positive de la grille renforce le courant de plaque de la lampe, ce qui accroît l'amplitude du courant oscillatoire du circuit oscillant et de l'antenne. Le courant de plaque est moindre pendant la demi-période suivante où la grille est négative. Les variations du courant de plaque ont la période des oscillations de l'antenne.

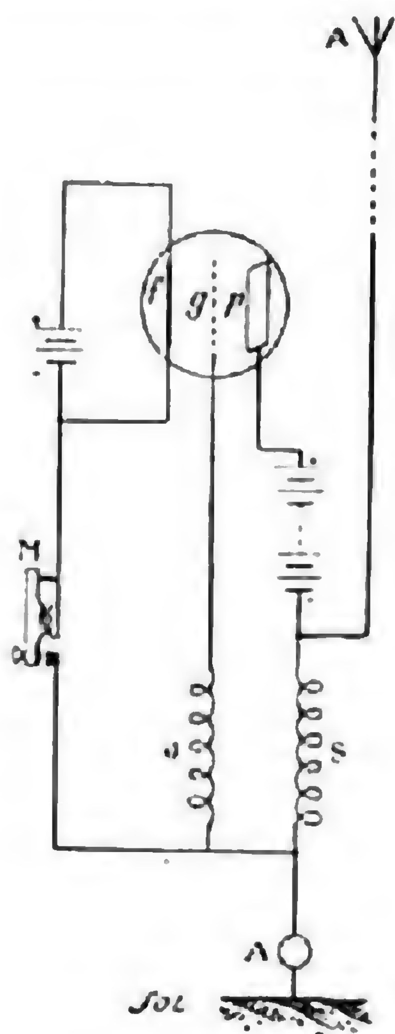


Fig. 63.

En établissant convenablement les conditions d'entretien, l'accroissement d'énergie communiqué à l'antenne, pendant la demi période de renforcement *peut compenser* les pertes d'énergie de l'antenne, pendant une oscillation complète.

La grille de la lampe à trois électrodes fonctionne dans ces circonstances comme un *relais* qui emprunte pendant la moitié d'une oscillation du système oscillant une énergie que fournit la pile du circuit plaque-filamant.

C'est d'une façon analogue que sont entretenues les oscillations d'un pendule d'horloge. Le jeu d'un relais automatique d'échappement fait intervenir pendant une demi oscillation d'une oscillation complète du pendule une énergie que fournit le moteur des rouages. La grille a le rôle de l'échappement, en ouvrant et fermant alternativement le circuit de la pile plaque-filamant.

Les oscillations ne peuvent être entretenues, que si les

sens des enroulements sont convenables sur S et sur *s* : une étude minutieuse permet de calculer les valeurs qu'il faut donner, pour le réglage, aux capacités, aux self-inductions et au pouvoir amplificateur.

Un ampèremètre A, placé sur le conducteur qui va de l'antenne à la terre, donne une déviation lorsque les oscillations sont amorcées et entretenues dans l'antenne.

On dispose à la place du manipulateur un microphone en dérivation, s'il s'agit de téléphonie.

On emploiera, en particulier, d'une façon avantageuse, un petit poste émetteur à lampe comme *hétérodyne* dans une réception.

Les lampes à trois électrodes servent à la production de courants alternatifs de haute fréquence dans des postes radiotélégraphiques et radiotéléphonigues de toutes puissances et aussi pour la téléphonie à haute fréquence par fil conducteur (page 49). Elles prennent alors, au besoin, de grandes dimensions et peuvent supporter de notables variations de température.

TÉLÉMÉCANIQUE SANS FIL

La conductibilité intermittente d'un radioconducteur n'a pas, par l'intermédiaire d'un relais, seulement pour application l'inscription d'un signal, elle donne aussi le moyen de commander à distance, à un instant donné, soit un effet direct d'un courant : calorifique, lumineux, magnétique, soit les actions mécaniques variées que permet l'emploi des électro-aimants.

On peut affirmer, d'une manière générale, que tout appareil qui obéit à un courant continu, par des fils de ligne, est susceptible, *quel que soit l'agencement de ses organes*, de fonctionner sans qu'il y ait à modifier sa constitution, par l'intermédiaire d'un courant alternatif de haute fréquence se propageant dans l'espace entre deux antennes. Le passage d'une commande par fil de ligne à une commande sans fil de ligne n'exige, en définitive, qu'un changement dans la nature du courant de transmission. Les conditions qui président à la propagation de trains d'oscillations électriques entre un poste transmetteur et un poste récepteur sont, en télémécanique sans fil, les mêmes qu'en télégraphie sans fil.

La conductibilité d'un radioconducteur à un poste de réception, provoquée par des ondes électriques issues d'un poste d'émission, entraîne, *par l'intermédiaire d'un relais*, comme pour l'inscription d'un signal dans un circuit local agencé à l'avance, les déclanchements que l'on est capable de réaliser dans une commande par fil de ligne.

L'opérateur du poste transmetteur agit sur un poste récepteur où tout a été préparé et où personne n'a à intervenir ; il produit les différents effets dans un ordre préalablement organisé et *dont il a été le maitre*, les laisse persister pendant un temps arbitraire, les suspend à volonté. Des *appareils de sécurité* peuvent aussi avoir été installés pour préserver d'effets dus à des commandes perturbatrices. Le poste de réception sera fixe, ou il sera mobile, navire ou avion. Une *télégraphie* sans fil, *automatique*, fonctionnant au poste de réception, peut en outre signaler au poste de commande l'exécution des effets à mesure qu'ils sont obtenus [1].

Un contact redresseur sensible, tel qu'un contact : *galène, fil de platine*, ne peut être utilisé seul, en Télémécanique sans fil, comme l'est un radioconducteur, car le courant qu'il laisse passer n'a pas une puissance suffisante pour mettre en action un relais. Mais les propriétés des lampes à vide à trois électrodes ont apporté à la Télémécanique de nouvelles et précieuses ressources, pour la réalisation et la protection des commandes. En effet, l'*amplification* par les lampes à trois électrodes permet de faire fonctionner un relais. D'autre part, la sureté de leur emploi a fait faire de grands progrès à l'établissement de résonances entre l'émission et la réception et a permis d'assurer la protection, sans apporter un trop grand retard à l'exécution.

Comme les antennes de transmission et de réception peuvent se déplacer l'une par rapport à l'autre sans que leur liaison spéciale soit rompue, la télémécanique sans

1. Ces expériences, appliquées à différents effets produits à volonté, se suivant dans un ordre arbitraire, avec avis automatique d'exécution, ont été réalisées, par M. Branly, dans une conférence au Trocadéro, en juin 1905.

fil est devenu apte à de multiples emplois aussi bien au point de vue militaire qu'au point de vue industriel, dans les conditions les plus variées.

Bien entendu, dans la télémécanique sans fil, *il n'y a qu'une commande d'un effet à provoquer, il ne peut être question d'une transmission à distance de l'énergie dépensée par l'effet commandé.* L'énergie dépensée reste localisée au poste d'exécution, elle y a été mise en réserve et rendue disponible à l'avance ; elle y est utilisée, elle ne vient pas du poste de commande. Si, au poste de commande, on doit quelquefois mettre en jeu une grande puissance d'émission, afin d'agir à une très grande distance, il n'en parvient qu'une fraction minime au poste de réception, tout juste assez pour faire fonctionner un relais. Vu l'absence de direction et de concentration, l'énergie considérable qui est absorbée pour toute commande au poste d'émission est jusqu'ici disséminée dans l'espace.

TÉLÉPHONIE SANS FIL

La téléphonie étant une variété de la télégraphie, on n'a pas manqué de concevoir une téléphonie sans fil dans laquelle une antenne d'émission agit sur une antenne de réception, mais la réalisation en a été longtemps retardée. Cela provenait de la nécessité d'obtenir, pour la téléphonie sans fil, la persistance du courant alternatif qui devait franchir l'intervalle des deux antennes.

Au début, les seuls courants alternatifs qui possédaient une fréquence suffisante pour permettre la commande d'effets sans fil de ligne, étaient des décharges de condensateurs. Mais, si rapprochées qu'elles fussent, ces décharges restaient beaucoup trop intermittentes. Les courants alternatifs d'une décharge isolée ne comprennent, en effet, qu'un nombre trop restreint d'oscillations et la durée de ces oscillations n'est qu'une très faible fraction de l'intervalle de temps qui sépare deux décharges.

La brièveté d'une décharge était sans importance en télégraphie sans fil, avec l'usage d'un alphabet, où les signaux sont des combinaisons de points plus ou moins rapprochés. Il suffit alors que le courant ait lieu au moment même où l'on provoque un signal, et ce courant peut n'avoir qu'une durée extrêmement courte, lorsqu'il est suffisamment fort. S'agit-il de reproduire, avec ses modulations, une parole qui frappe un microphone, le courant qu'elle doit modifier, par ses vibrations successives, a besoin d'être maintenu. Une excitation intermittente par des étincelles ordinaires de décharges de condensateurs ne pouvait donc pas convenir en radiotéléphonie.

Des oscillations électriques de haute fréquence, d'amplitude uniforme, *entretenues* dans une antenne, se prêtent immédiatement aux émissions radiotéléphoniques. Les *lampes à trois électrodes* sont des sources d'oscillations qui remplissent les conditions exigées.

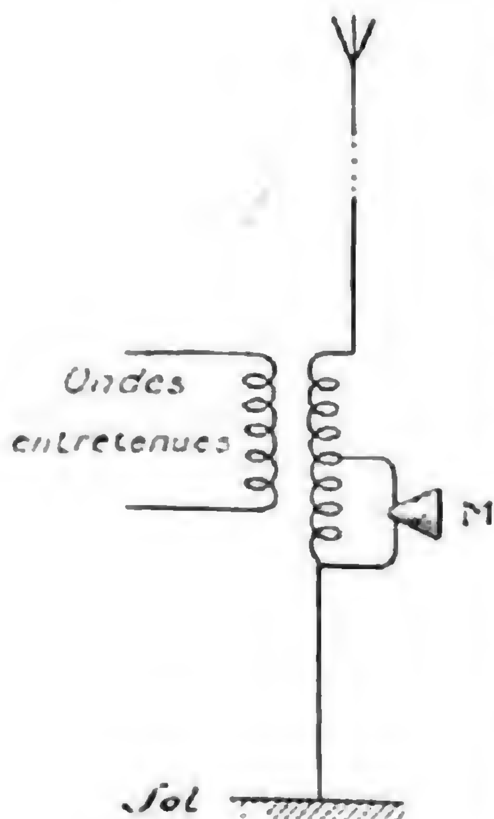


Fig. 64.

Dans un poste d'émission à oscillations entretenues[1], le microphone M devant lequel on parle, peut être placé en dérivation sur quelques tours d'une *spirale* qui fait partie de l'antenne d'émission (fig. 64). Quand le microphone n'est influencé par aucun bruit, les oscillations de haute fréquence qui circulent dans l'antenne, gardent une amplitude constante. Vu leur haute fréquence, elles sont sans action sur le téléphone du poste récepteur.

Vient-on à parler devant le microphone, les variations de résistance des contacts qui, en téléphonie ordinaire, substitueraient une courbe microphonique à la ligne horizontale d'un courant continu, exercent ici une action analogue. Les modifications ou *modulations* que le microphone impose à la succession des oscillations de haute fréquence de la *spirale* et, par conséquent aussi de l'antenne, ont les mêmes périodes que les ondes sonores, elles affectent les deux alternances des oscillations de l'antenne (fig. 65).

1. Les oscillations entretenues sont, en station fixe, dues à des alternateurs de haute fréquence : les lampes à vide sont les sources d'oscillations en station fixe ou mobile.

Par induction à distance, d'antenne d'émission à antenne de réception, à travers le milieu qui sépare les deux postes, les oscillations de haute fréquence de l'émission font naître des oscillations correspondantes de réception, si les deux circuits des antennes en correspondance sont accordés et le courant oscillatoire modulé par le microphone est reproduit (fig. 65). Ces oscillations modulées circulent dans une dérivation de l'antenne de réception où un détecteur les redresse. Les courants *redressés* parcourent le fil d'un téléphone qui répète la parole sans déformation. Insensible à la haute fréquence des oscilla-

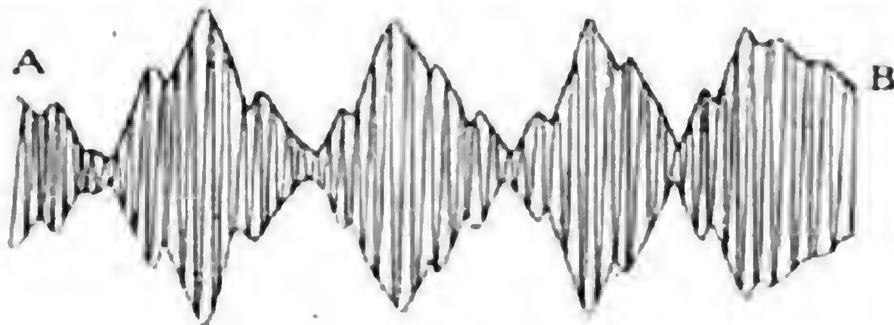


Fig. 65.

tions qui transportent les courbes microphoniques, en leur servant de support, la membrane du téléphone obéit à la basse fréquence des ondulations de ces dernières.

A la réception, les ondulations de la courbe microphonique ayant une fréquence directement perceptible, la téléphonie sans fil est plus simple que la télégraphie sans fil par ondes entretenues ; elle n'exige ni appareil tranchant régulièrement le courant alternatif un grand nombre de fois par seconde, ni hétérodyne. Le poste récepteur est le même que celui de la télégraphie sans fil par étincelles ou par ondes amorties (fig. 47). Le détecteur employé est indifférent : ce sera, si l'on veut, un détecteur à galène ou une lampe à trois électrodes.

Dans les deux téléphonies, avec fil et sans fil, l'opération initiale d'une part et l'opération finale d'autre part sont de même nature ; le courant porteur de la modulation et le milieu de circulation sont différents. En téléphonie sans fil le milieu de circulation est moins susceptible d'altérer la parole que le milieu de circulation de la téléphonie ordinaire.

Les bruits parasites sont plus gênants qu'en télégraphie; il est, en effet, moins aisé de suivre les modulations de la voix que de percevoir les signaux Morse.

La portée *directe* est moindre qu'en télégraphie sans fil. Cela s'explique. En radiotélégraphie, la transmission par trains égaux donne à tous les signaux la même intensité. En radiotéléphonie, certaines syllabes qui impressionnent peu les microphones, sont perçues plus difficilement que d'autres. On a augmenté toutefois d'une façon inespérée la portée en faisant usage d'amplificateurs.

La *radiotéléphonie* a sur la radiotélégraphie le grand avantage de s'exprimer en langage clair ; elle n'exige pas la connaissance des signaux Morse et l'habitude de la lecture au son. *Sans apprentissage*, les marins, les aviateurs, les particuliers peuvent recevoir directement les nouvelles. La radiotéléphonie est, pour cette raison, appelée à remplacer dans un grand nombre de cas la radiotélégraphie. D'autre part, les auditions lyriques et musicales par téléphonie sans fil sont fort appréciées.

Pour écouter les concerts, recevoir les prévisions météorologiques, les signaux horaires, les nouvelles de presse, un simple poste récepteur avec téléphone suffit. On ne songe pas alors à établir une correspondance. D'ailleurs, en radiotéléphonie, il n'est pas possible d'entretenir une conversation comme en téléphonie ordinaire, c'est à dire de parler et d'écouter simultanément en face d'un même appareil.

DIRECTION D'UN RAYONNEMENT ÉLECTRIQUE

Diriger, d'une part, un rayonnement électrique pour concentrer son énergie et, d'autre part, reconnaître la position d'une source de rayonnement électrique pour le recevoir avec un maximum d'intensité, sont les problèmes qui forment l'objet de la *radiogoniométrie*. Ils apparaissent, tout d'abord, plus compliqués que les problèmes optiques correspondants. Ils ont pu cependant être résolus et, même, ils le sont dans des circonstances où la lumière trouverait des obstacles insurmontables.

Si l'on voulait, à l'aide de miroirs ou de lentilles, concentrer un faisceau de radiations électriques pour lui procurer une intensité suffisante dans une direction, comme on le fait pour des rayons lumineux, il faudrait, vu la grande longueur d'onde des radiations électriques usuelles, donner aux miroirs et aux lentilles des dimensions exceptionnelles qui rendraient leur usage impraticable. Il en est déjà ainsi pour des rayons électriques dont la longueur d'onde a une dizaine de mètres ; les procédés optiques de concentration et de direction ne pourraient servir, par conséquent, que pour des sources électriques de très minime puissance. Un faisceau de radiations électriques n'a en effet qu'une bien faible énergie si sa longueur d'onde est inférieure à trois cents mètres.

On s'est borné, pour diriger et recevoir les rayons électriques, à faire usage d'antennes et de cadres.

Une règle générale, précédemment énoncée, sera d'abord

utilement rappelée. Une forme de circuit, qui émet, dans une direction déterminée, un rayonnement électrique plus intense que dans tout autre, a aussi un pouvoir collecteur plus grand pour cette même direction. C'est de cette façon qu'on fait servir, dans les stations, une même antenne pour la transmission et pour la réception. L'application de cette règle de réciprocité facilite l'énoncé des lois.

ANTENNES

Il n'est pas douteux qu'une antenne symétrique, telle qu'une antenne verticale et cylindrique, dissémine son rayonnement également en tous sens. Elle convient donc pour atteindre des postes mobiles dont la position est ignorée. En cas de postes fixes en correspondance il y a économie d'énergie radiante et le secret est mieux assuré, si l'on est maître d'imposer une direction au rayonnement. Une antenne dissymétrique le permet.

Il a été reconnu qu'une *antenne d'émission coudée*, formée d'une courte branche verticale plongeant dans le sol

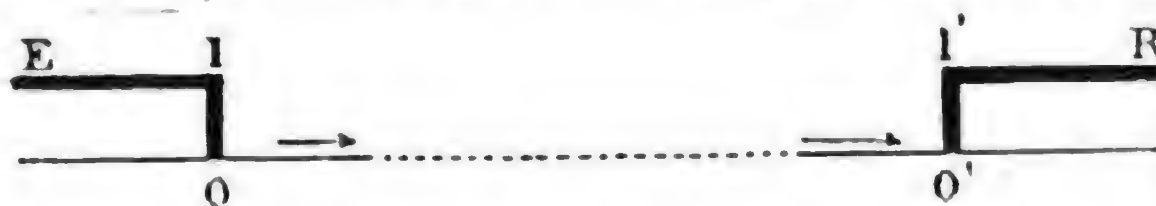


Fig. 66.

et suivie d'une longue branche horizontale libre, envoie un rayonnement *maximum dans le plan de ses deux branches* et dans le sens de l'extrémité mise à la terre.

Dans ce cas, une antenne verticale utilisée comme récepteur, offre un maximum de réception quand elle est dans le plan de l'antenne coudée, mais il vaut mieux

prendre pour antenne réceptrice une antenne coudée qui est également dissymétrique pour la réception.

Avec une antenne verticale pour excitateur, si l'on prend comme récepteur une antenne coudée horizontalement, et, si l'on fait tourner la branche horizontale dans un plan horizontal autour de l'extrémité qui plonge en terre, la réception est maximum lorsque le plan vertical de l'antenne de réception contient l'antenne d'émission.

La meilleure condition de correspondance, pour l'émission et la réception entre deux antennes coudées, est celle où les deux antennes sont dans le même plan, avec leurs deux extrémités libres dirigées en sens inverse l'une de l'autre (fig. 66). Les extrémités mises à la terre se font face.

CADRES

Pour émettre des radiations dans une direction déterminée, ou pour repérer la position de postes radiotélégraphiques, on fait actuellement souvent usage de circuits fermés verticaux qu'on peut orienter. Ce sont des cadres en bois, de forme rectangulaire ABCD ou hexagonale, symétriques par rapport à un axe vertical *yy* autour duquel ils peuvent *tourner* (fig. 67). Sur le cadre sont

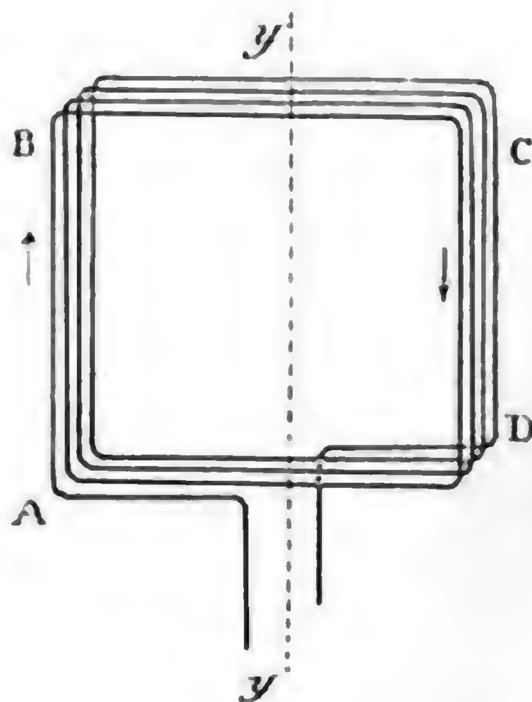


Fig. 67.

enroulées des spires isolées d'un fil conducteur que parcourt un courant alternatif de haute fréquence ; les extrémités du fil sont reliées aux armatures d'un condensateur de capacité variable, annexé au cadre, qui permet de déterminer la période du circuit.

Un cadre tournant disposé verticalement et orienté, peut remplacer une antenne coudée. Il envoie un *rayonnement maximum dans son plan* ; dans une direction perpendiculaire à son plan, son émission est nulle ; il est toutefois rarement employé pour l'émission. Il *reçoit d'autre part, avec une intensité maximum* les rayonnements qui sont situés *dans son plan*. C'est ainsi qu'un cadre reçoit un maximum d'énergie d'une antenne quand le plan de ses spires, vertical, passe par l'antenne.

Le pouvoir rayonnant d'un cadre émetteur, ou le pouvoir collecteur d'un cadre récepteur, est proportionnel à sa surface et au carré du nombre de ses spires.

A un poste d'observation, pour repérer la direction d'émission d'un poste de télégraphie sans fil, on fait usage d'un cadre. Les extrémités du fil du cadre sont branchées à un appareil récepteur. On cherche, en faisant tourner le cadre, l'orientation qu'il faut lui donner, pour avoir le maximum, puis le minimum d'audition du poste émetteur (fig. 68). Le minimum se reconnaît mieux que le maximum.

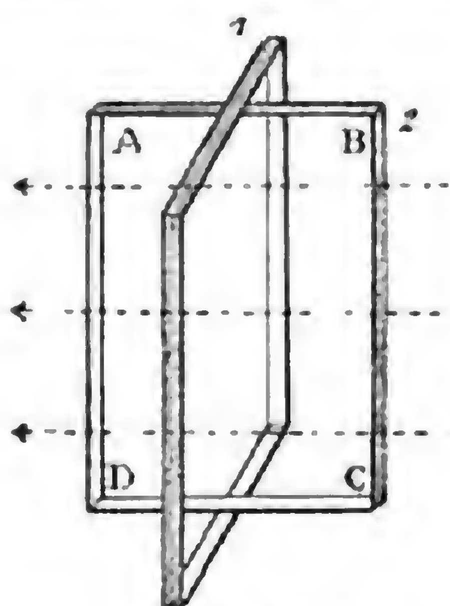


Fig. 68.

Un cadre ayant un *faible pouvoir rayonnant* et un *faible pouvoir collecteur*, il a été néces-

saire d'établir, d'abord, la résonance entre l'émission et la réception. Associée à la *résonance*, l'*amplification* a permis de recevoir, avec un cadre, sans antenne, des messages venus de très loin. On avait, au début, fait usage de cadres de grandes dimensions, dont le maniement était difficile ; grâce à l'amplification, des dimensions moyennes sont devenues suffisantes. Les cadres constituent alors des récepteurs faciles à manier, peu encombrants, fréquemment employés en radiotéléphonie.

Dans la réception par cadre, les parasites atmosphériques sont amplifiés comme les signaux, mais ils sont beaucoup moins nombreux que dans la réception par antenne.

Deux directions étant nécessaires pour déterminer un point par leur intersection, la direction signalée par un seul cadre ne fixe pas la *position* d'un poste d'émission. En outre, la direction fournie par un cadre n'étant qu'approximative il convient de combiner les indications qui sont trouvées avec plusieurs cadres goniométriques placés en des postes convenablement espacés. En marquant sur une carte la position des différents récepteurs et en traçant les orientations des maxima de réception observés, *le point de concours* de ces directions détermine le siège du poste émetteur. On a souvent recours à trois directions ; si la surface du petit triangle formé sur le tracé par les intersections des directions prises deux à deux est très réduite, le degré d'approximation est satisfaisant.

Applicable à la recherche de postes fixes ou mobiles, cette méthode est particulièrement intéressante pour faire connaître la position de navires, de sous-marins, de

dirigeables, s'ils lancent, *eux-mêmes*, des signaux radiotélégraphiques.

Par exemple, un navire qui fait usage de son poste peut être repéré d'après les signaux que des stations côtières en ont reçus. Réciproquement, à bord, on détermine la direction de signaux qui émanent de stations fixes connues, et on en tire la position géographique du navire.

Si le navire ne dispose pas de cadres radiogoniométriques et n'est muni que d'un simple poste de télégraphie sans fil, il ne déterminera pas lui-même sa propre position, mais comme il a pu être repéré sur sa demande par des stations côtières, l'indication de sa position lui sera transmise, à une heure convenue, par les postes qui ont reçu ses signaux. Les mêmes opérations peuvent se faire avec un dirigeable.

Un cadre goniométrique est utilisable dans d'autres circonstances. Si, par exemple, un cable métallique parcouru par un fort courant alternatif se trouve immergé le long d'un passage en zone maritime dangereuse, le maximum du son du téléphone d'un cadre goniométrique fixé sur un navire en cours de route fera savoir si le cable est bien suivi. L'orientation perpendiculaire du cadre pour le minimum apportera une confirmation.

Des cables à courant alternatif soutenus par des poteaux pourront dans certains cas guider d'une manière analogue des avions commerciaux.

LE PRÉSENT ET L'AVENIR DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

L'exposé sommaire des principes et des procédés de la Télégraphie sans fil fait voir que, si le nouveau mode de communication à distance a utilisé avantageusement pour son organisation des connaissances antérieurement acquises, les besoins de son fonctionnement ont, eux-mêmes, suscité des recherches qui ont étendu le domaine scientifique. En effet, si la science proprement dite mène à des applications profitables, ces applications provoquent, en retour, des progrès de la science pure.

La télégraphie par induction électrique, pratiquement instantanée, sans lien matériel visible entre deux stations, effectuée avec des courants d'émission alternatifs et périodiques, dont la longueur d'onde est comprise entre 150 mètres et 30 kilomètres, a conduit à des résultats inattendus et mis en œuvre des appareils révélateurs et amplificateurs dont la sensibilité a dépassé progressivement toutes les prévisions. On est parvenu à recueillir des émissions extrêmement faibles et à les séparer d'une infinité d'autres qui sillonnaient en même temps l'espace. Les applications ayant devancé la théorie, le rôle radiotélégraphique de l'atmosphère offre encore des incertitudes et de nouvelles recherches sont nécessaires.

L'entraînement a été immense au point de vue pratique, les stations radiotélégraphiques ne cessent de se multi-

plier. D'abord limitées au voisinage des côtes, elles ont gagné les régions intérieures des deux continents. Les postes dont la portée dépasse 1.000 kilomètres, se comptent actuellement par centaines.

De nombreuses stations radiotéléphoniques à haute fréquence fonctionnent aussi en France et à l'étranger.

De grands postes, tels que ceux de Paris, Lyon, Nantes, Croix d'Hins à Bordeaux, Sainte-Assise à Melun, en France ; puis Vienne, Moscou, Varsovie, Sofia, Rome, Belgrade, Nauen près de Berlin, Clifden en Irlande, pour ne citer que des postes d'Europe, entretiennent des correspondances constantes sur des rayons de plusieurs milliers de kilomètres. Quelques-uns de ces postes mobilisent des puissances motrices considérables, afin d'entretenir un rayonnement électrique intense. Ils dispersent ce rayonnement par des centaines de fils d'antennes que soutiennent d'énormes pylônes. Les prises de terre correspondantes se font par des réseaux métalliques qui occupent sur le sol des surfaces très étendues. Pour une portée qui n'est que peu inférieure à celle des grands postes, la tour Eiffel, haute de 300 mètres, a une antenne de six fils ayant chacun 500 mètres de longueur ; la tour leur sert de support. Les signaux de la tour Eiffel couvrent l'Europe, le nord de l'Afrique ; ils vont au Canada. Les communications de la métropole avec les colonies sont assurées par des postes installés en Afrique, en Indo-Chine. Pour des distances qui dépassent, dans une grande mesure, la portée de la tour Eiffel, la station de Sainte-Assise, près de Melun, utilise une antenne supportée par 17 pylônes, hauts chacun de 250 mètres qui occupent, dans leur ensemble, une surface de 180 hectares.

A la station transcontinentale du Centre radioélectrique

de Sainte-Assise, la puissance dans l'antenne d'émission est de 1500 kilowatts.

Grâce à l'amplification, la portée s'étend à toute la surface de notre globe et les dépêches parviennent sans relais aux antipodes[1].

SÉCURITÉ APPORTÉE A LA NAVIGATION

La radiotélégraphie, intéressante déjà par les distances considérables qui sont directement franchies en un temps extrêmement réduit, tire sa plus grande importance de ce que ses postes peuvent être mobiles sans cesser de rester en correspondance. De là résultent des services spéciaux rendus à la navigation, dans des circonstances où toute télégraphie restait absolument impuissante.

Les lignes de transports maritimes possèdent, sur tous leurs navires, des postes de télégraphie sans fil pourvus d'antennes élevées le long des mâts. Ces postes sont en communication constante avec la terre ferme, soit directement, soit par l'intermédiaire de navires en cours de route. Un bâtiment qui assure un service de passagers reçoit, chaque jour, les nouvelles du monde entier ; les voyageurs peuvent être, souvent par radiotéléphonie, mis en mesure de maintenir leurs relations avec leurs correspondants d'affaires et avec leur famille.

La sécurité de la navigation, précédemment précaire, a été ainsi tout à coup extraordinairement accrue. Une

1. La perception des signaux a paru être meilleure à l'antipode d'un point d'émission qu'aux points voisins. Cela s'expliquerait peut-être en considérant que, pour parvenir à l'antipode, tous les chemins étant égaux sur la sphère terrestre, les ondes de toute direction issues du point de départ contourneraient la terre et s'y rencontreraient en concordance.

longue traversée n'offre plus les mêmes incertitudes qu'autrefois, puisque l'isolement est supprimé si le navire est muni d'un poste radiotélégraphique. Les sauvetages dus à la télégraphie sans fil ne se comptent plus. A maintes reprises, des appels de *détresse* réitérés, partis d'un bâtiment en perdition et disséminés instantanément sur de très vastes espaces, ont fait connaître sa position géographique et ont permis de lui apporter un secours efficace.

Des réponses de diverses provenances sont, dans ce cas, successivement reçues, elles rassurent voyageurs et équipage ; les manœuvres qui peuvent éviter ou retarder l'abandon du bâtiment continuent à être exécutées sans trouble. Après quelques heures, parfois plus rapidement, plusieurs navires accourus de diverses directions, s'accordent pour associer leurs secours et recueillir, s'il y a lieu, les naufragés. La télégraphie sans fil n'a été impuissante que lorsque le bâtiment a sombré trop rapidement pour que l'utilisation des canots de sauvetage ait été possible.

Avec un rôle modeste, mais précieux, des postes radiotélégraphiques de faible portée, ou *radiophares*, échelonnés sur certaines côtes, au voisinage d'écueils et de passages dangereux, en émettant des signaux spéciaux, répétés plusieurs fois par minute, renseignent sur leur position des bâtiments égarés auxquels la brume cache les phares lumineux.

Les dirigeables et les avions sont actuellement munis d'appareils radiotélégraphiques ou radiotéléphoniques ; la sécurité de la navigation aérienne se trouve donc, elle aussi, considérablement améliorée.

SIGNAUX HORAIRES

Chacun sait combien est indispensable au marin la connaissance exacte de sa position en cours de route. Il a besoin, pour déterminer son *point*, de connaître la longitude et la latitude du lieu où il se trouve. Certaines observations astronomiques, qui lui sont familières, lui donnent la latitude ; il obtient de même aussi l'heure locale. La *longitude* se déduit, d'autre part, de la différence, à un même instant, entre l'heure locale et l'heure d'un méridien pris pour origine ; des montres de précision, que le navire a emportées et qui ont été réglées au départ, ont dû *conserver* l'heure d'un méridien connu. Mais la marche d'une montre n'est jamais rigoureusement régulière, et quelques secondes d'écart par jour conduiraient, en s'ajoutant pendant le cours du voyage, à un total qui ne serait pas négligeable. Actuellement, des signaux lancés, chaque jour, par le poste radiotélégraphique de la tour Eiffel, à des heures fixes, font entendre à toute distance en mer, l'heure exacte du méridien adopté pour origine. A ce moment, les marins sont en mesure de rectifier l'heure des montres.

La même méthode est appliquée dans de grands espaces, insuffisamment connus. Des explorateurs en pays désertiques, munis d'appareils récepteurs de télégraphie sans fil, reçoivent également les signaux horaires de Paris et ont, ainsi, la possibilité de déterminer la position géographique des points principaux de leur parcours.

Un signal du poste de la tour Eiffel est reçu presque *instantanément* à de très grandes distances, puisqu'il

franchit, à travers l'air, trois mille kilomètres en un centième de seconde.

Pour assurer la plus grande précision dans l'envoi des signaux horaires, une ligne souterraine à double fil, renfermant une pile, a été établie en permanence entre le pendule de l'heure à l'Observatoire de Paris et la station radiotélégraphique de la tour Eiffel. Le pendule ferme lui-même, au moyen d'un contact, le circuit de la ligne au moment qui convient. Le courant électrique, qui passe alors dans la ligne, fait fonctionner par l'intermédiaire d'un relais, le manipulateur qui lance le signal horaire[1].

RENSEIGNEMENTS MÉTÉOROLOGIQUES

En dehors des signaux horaires, plusieurs postes et, en particulier, le poste de la tour Eiffel propagent des renseignements météorologiques qui font connaître, à une infinité de postes récepteurs, les mesures effectuées chaque jour en certaines stations déterminées du globe sur la *pression atmosphérique*, la *direction* et la *force du vent*, l'*état de la mer*. Ces indications permettent de se prémunir à temps contre les dangers de fortes perturbations. Des observations recueillies au large de l'Océan Atlantique sont également transmises aux continents.

A titre d'avertissements agricoles, il est utile de publier des probabilités relatives aux changements atmosphériques et à la prévision du temps. Ces renseignements sont également précieux pour le cabotage et la pêche.

1. La réception des signaux horaires se fait avec une précision de l'ordre de un quart de seconde de temps. Cette précision correspond à une centaine de mètres d'erreur possible sur une longitude.

A cet effet, la tour Eiffel a organisé un service quotidien de renseignements par téléphonie sans fil. En outre, à d'autres heures, également convenues, viennent les nouvelles de presse et enfin, pour l'agrément d'un nombre toujours croissant d'amateurs, des concerts. Chaque commune peut posséder un poste de réception, vu le prix peu élevé de son installation. Dans les villes, les appareils particuliers de réception ne se comptent plus.

Les renseignements météorologiques sont particulièrement indispensables aux dirigeables et aux aéroplanes. Ils les engagent à avancer ou à reculer un départ. En cours de route, la recherche d'un lieu d'atterrissage peut être envisagée sans précipitation, avant le déclanchement des troubles atmosphériques annoncés.

Etudes météorologiques.

Avant que la conductibilité intermittente des radioconducteurs eût été appliquée à la télégraphie sans fil, différents expérimentateurs avaient essayé d'en tirer parti pour une étude des orages.

Actuellement, les communications radiotélégraphiques se trouvent fréquemment, surtout dans les régions tropicales, fortement gênées par des chocs plus ou moins brusques, mêlés aux signaux de postes en correspondance. On a donné à ces chocs, d'intensité variable, le nom de *parasites*, par opposition aux chocs intentionnellement transmis. Les amplificateurs renforcent à la réception les parasites autant que les signaux utiles, aussi, pour faire prédominer ceux-ci, convient-il d'augmenter le plus possible la puissance des postes d'émission. D'autre

part, afin de tirer parti de troubles que l'on n'est pas encore maître d'éviter, il y a lieu d'espérer que l'observation méthodique des parasites et leur classement suivant le genre de sons qu'ils apportent au téléphone renseigneront sur la production et la marche de certains troubles aériens. Il est possible que ces observations, patiemment suivies, apportent des connaissances plus précises sur la physique des hautes régions de l'atmosphère et qu'elles soient la source d'utiles indications météorologiques et même de lois pour une prévision du temps prochain.

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL EN TEMPS DE GUERRE

Le rôle de la télégraphie sans fil en *temps de guerre* est particulièrement important. Alors que les armées en campagne se déplacent, que les communications sont coupées, que des régions étendues sont bloquées, le fonctionnement de la télégraphie sans fil se présente comme indispensable et son emploi devient incessant. Les troupes possèdent des postes mobiles auxquels est attaché un personnel exercé et il en est fait un large usage. Dans ce cas, les postes d'émission à oscillations entretenues par des lampes à trois électrodes, et les postes de réception à hétérodyne sont avantageux.

La téléphonie sans fil est de même facile à réaliser avec un poste récepteur ordinaire et elle est, en maintes circonstances, préférable à la télégraphie sans fil. Sur mer, la transmission des ordres, entre navires de guerre, par radiotéléphonie, est commode et rapide.

Indépendamment de la détermination par cadres radiogoniométriques de la position de postes d'émission

ennemis, la télégraphie sans fil prend part à la guerre de mouvements, elle établit un *lien méthodique* entre les troupes qui attaquent une position et les avions qui sont chargés de la reconnaître. L'aviateur repère les batteries, les ouvrages fortifiés, les rassemblements ; il en signale la situation à l'artillerie. Constatant ensuite les effets des projectiles qui ont été dirigés suivant ses indications, il renseigne sur les écarts à corriger. L'entente entre l'artillerie et l'aviation permet un rapide réglage des tirs.

Les communications lointaines par les lignes télégraphiques ordinaires étant coupées, la télégraphie sans fil a maintenu, pendant les hostilités, les relations de la France, de l'Angleterre, et de l'Italie avec la Russie, la Roumanie, les armées d'Orient.

En dehors de la guerre, en cas de manifestations dangereuses, l'établissement d'une liaison radiotéléphonique entre postes sur voitures automobiles et postes sur avions a pu conduire à des ententes rapides permettant, par exemple, de disperser des rassemblements.

ROLE COMPARÉ DES DEUX TÉLÉGRAPHIES

En *temps de paix*, la télégraphie ordinaire et la télégraphie sans fil sont-elles destinées à fonctionner en collaboration, ou à lutter pour une prééminence ?

Si l'on jette un coup d'œil d'ensemble sur les qualités et les défauts des deux télégraphies, on peut dire que la télégraphie avec fil de ligne satisfait aux exigences de la vie courante, partout où son service est régulièrement organisé. Entre les continents, un câble sous-marin rem-

plit correctement sa mission, mais il offre l'inconvénient d'abandonner les messages au contrôle de la puissance à laquelle il appartient. En outre, en cas d'avaries, la réparation d'un câble risque quelquefois d'être longue et la radiotélégraphie intervient a i moins alors en suppléance. Il est essentiel d'ajouter que les câbles sous-marins ne se prêtent pas à la téléphonie. On prévoit que les progrès réalisés dans les communications radiotélégraphiques à très grande distance rendront superflue la pose de nouveaux cables transocéaniques.

C'était de l'intensité et de la multiplicité des signaux *parasites* que provenait le principal obstacle à la régularité de certaines transmissions sans fil. Or, l'introduction dans les postes radiotélégraphiques à trafic important, d'une manipulation à grande vitesse, augmentera dans la proportion de cinq, par exemple, le nombre de mots transmis en une minute, sans qu'il y ait de changement dans le nombre de signaux parasites intercalés. D'ailleurs, de nouveaux procédés de résonance permettront probablement, dans un avenir prochain, de négliger un plus grand nombre de signaux parasites à la réception.

Enfin, dans de vastes régions continentales où des fils télégraphiques n'ont pas encore été posés, dans certaines régions de l'Afrique et de l'Asie, en Amérique du sud, la radiotélégraphie évitera les dépenses onéreuses de l'installation des fils et les difficultés de leur entretien et de leur protection.

Si la télégraphie sans fil a des avantages précieux, elle a aussi des défauts qui ne sont pas négligeables. Le secret d'un message qui suit un fil de ligne paraît mieux assuré que s'il circule en tous sens à travers l'espace. En effet,

si satisfaisante que soit la résonance, elle n'est pas discrète. Un opérateur exercé arrive très vite à dépister, avec son récepteur réglable, l'accord qui se rapporte à un poste et à capter ses communications. Un langage chiffré, à modifier de temps en temps, peut donc quelquefois devenir indispensable.

Il convient pourtant d'ajouter que c'est l'indiscrétion de la radiotélégraphie et surtout de la radiotéléphonie qui a contribué à leur extraordinaire vulgarisation. Le temps vient où chacun voudra, à la campagne comme à la ville, pouvoir prendre part, par téléphonie sans fil, aux concerts, aux conférences, aux représentations théâtrales. Les appareils récepteurs répandus par le commerce à des prix de plus en plus réduits sont déjà d'un emploi si simple qu'aucune connaissance scientifique n'est nécessaire pour en faire le meilleur usage. Puissent ces avantages contribuer à repeupler les campagnes. On n'attendra plus que la télévision.

MESURES DE CONTROLE

La télégraphie sans fil n'est-elle pas susceptible de devenir dangereuse ? Si l'on a pu, en certains moments d'inquiétude, considérer la surveillance des lettres et des télégrammes comme indispensable au point de vue de la sécurité nationale et sociale, la télégraphie sans fil est, plus que tout autre mode de correspondance, capable de se dérober à un contrôle. Chacun sait que la réglementation de la réception serait illusoire. Quant aux postes d'émission, ils doivent remplir certaines conditions précises pour pouvoir légalement fonctionner et la radio-

goniométrie est en mesure de constater leurs écarts. Mais si l'on y regarde de près, on se rend aussi aisément compte de la difficulté du repérage d'un poste d'émission s'il a un usage intermittent, s'il se déplace, s'il emploie une longueur d'onde variable. Son usage clandestin, par-dessus les frontières, au profit de ceux qui préparent la guerre en temps de paix ou qui soutiennent l'ennemi en temps de guerre, peut être redouté. Une organisation d'une *police de l'éther* ne sera-t-elle pas nécessaire ?

D'ailleurs, la télégraphie et la téléphonie sans fil ne sont pas les seules applications possibles de la conductibilité intermittente des contacts imparfaits. Elles ne sont qu'un cas particulier d'une radiotélémécanique féconde en ressources. Il est suffisamment démontré qu'en se mettant à l'abri des perturbations par des combinaisons appropriées, on est maître de faire fonctionner des appareils de tout genre, agencés à l'avance et munis de leur source d'énergie, sans aucune intervention d'opérateurs agissant localement au lieu d'exécution. Les essais se sont surtout jusqu'ici orientés vers des applications de guerre et on a su diriger les évolutions, en mer de navires, de torpilles, de sous-marins non montés, en l'air d'aérostats sans pilote, plus ou moins chargés d'explosifs, dont la chute peut être commandée, à un instant propice, au delà des frontières.

Des avions ont été manœuvrés à grande distance, pendant plusieurs heures ; le chemin qu'on leur a fait parcourir en les maintenant en équilibre et en assurant de loin leur direction a atteint des centaines de kilomètres.

Certaines applications de la télégraphie sans fil que l'avenir nous réserverait seraient donc spécialement redoutables et il n'est pas superflu de les prévoir.

Ce n'est là, à vrai dire, qu'une généralisation toute naturelle. Si la Science a réussi à augmenter, dans une très large mesure, le bien-être de l'humanité, elle est en même temps l'agent de destruction le plus perfide.

Dans les cas particuliers visés ci-dessus, à défaut de moyens spéciaux de préservation contre des bombardements, suffira-t-il de recourir à de puissants producteurs d'ondes entretenues qui rendraient illusoires, pendant le temps nécessaire, des commandes radio-électriques de tout genre, en les noyant dans d'incessants parasites.

Sans garder l'illusion dangereuse qu'une extraordinaire force de destruction mettra fin aux guerres, il est permis d'espérer que la Science fournira elle-même, avant d'effrayants cataclysmes, des moyens efficaces pour mettre en garde contre les dangers des nouvelles découvertes.

SOCIÉTÉ D'IMPRIMERIE D'AMBILLY-ANNEMASSE (HAUTE-SAVOIE).

N° 1. ÉDOUARD MONTET
Professeur de langues orientales à l'Université de Genève, Ancien recteur

L'Islam

C'est un précis dans lequel l'Islam est étudié dans le passé et dans le présent, sous toutes les faces qu'il revêt, à tous les points de vue auxquels on peut l'examiner. *(L'Information marocaine.)*

Écrit par un spécialiste des plus compétents, ce livre présente sous une forme commode, un tableau rapide du passé, du présent et de l'avenir de l'Islam. L'exposé historique est d'une parfaite objectivité. *(La Revue Pédagogique.)*

N° 2. CAMILLE MAUCLAIR

Les Etats de la Peinture française de 1850 à 1920

L'éditeur Payot vient de lancer une nouvelle collection d'un format et d'une présentation très heureuse. L'art jusqu'ici y est représenté par les **Etats de la peinture française de 1850 à 1920**, par M. CAMILLE MAUCLAIR. Il y faut louer avec un récit toujours attachant et une répartition très claire des diverses tendances de l'art moderne, un bel effort de haute impartialité.
(Revue critique des Idées et des Livres.)

Dans son ensemble, avec ses tables de chapitres et de noms propres et surtout son excellente répartition, que voilà un précieux petit manuel pour qui ne sait pas se dépêtrer dans un salon ou un musée contemporain. *(La Revue Française.)*

N°s 3-4. RENÉ CANAT
Docteur ès-lettres, Profr de rhétorique supre au Lycée Louis-le-Grand

La Littérature française au XIXe siècle

2 tomes : Tome I (1800-1852) — Tome II (1852-1900)

Cette **Littérature française au dix-neuvième siècle** est une petite encyclopédie concentrée, mais complète, dans l'intéressante Encyclopédie française de haute culture de la librairie Payot, qui embrassera l'ensemble des connaissances humaines et dont les premiers spécimens ont une valeur incontestable.

Camille Le Senne

Ce petit ouvrage contient une vaste matière. Il était malaisé à écrire, car il ne devait contenir que des idées et des faits essentiels. L'auteur a réalisé sa tâche avec une aisance remarquable. Ses résumés sont clairs, précis, nourris, précédés d'examens généraux fort lucides. **Émile Magne.**

N° 5. LOUIS LEGER

Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France

Les anciennes civilisations slaves

Résumé clair et bien fait des connaissances actuelles sur les divers peuples slaves anciens.

A. Van Gennep. (*Le Mercure de France.*)

Il faut un profond savoir pour dire beaucoup de choses en peu de mots. M. Leger a su condenser en quelques pages tout ce que sa vaste érudition a recueilli sur le problème des origines des peuples slaves, le berceau de leur race, leurs migrations, leurs antiques institutions politiques, sociales et économiques, leurs traditions religieuses. (*Le Polybiblion.*)

N° 6. PAUL APPELL

Membre de l'Institut, Recteur de l'Université de Paris

Éléments de la Théorie des Vecteurs et de la Géométrie analytique

Avec 57 figures

Ce petit volume présente, sous une forme nouvelle, les théories relatives à la géométrie plane et à la géométrie dans l'espace, à la

construction des courbes et à celle des surfaces, aux propriétés de la tangente et de la normale à une surface ; ainsi que leurs applications aux droites, aux plans, aux courbes du second ordre et à la sphère. *(Le Génie Civil.)*

Ce livre est un véritable chef-d'œuvre. Lisez-le attentivement et vous acquerrez une notion exacte de l'analyse mathématique, ce qui vous instruira davantage sur la méthode des sciences que de gros traités de logique. Vous serez en mesure d'entrevoir la signification des Théories de Poincaré ou d'Einstein. Tous les jeunes philosophes devraient étudier le petit livre d'Appell !

(La Revue française.)

N° 7. COMMANDANT DE CIVRIEUX

La Grande Guerre (1914-1918)

Aperçu d'histoire militaire

Avec 2 cartes hors texte

Ce petit livre n'est pas un résumé sec de faits, de résultats, c'est vraiment la guerre avec ses grandeurs, ses hésitations et ses fautes. **Général Cordonnier.**

Cet exposé des évènements militaires sur tous les fronts d'Occident et d'Orient est complété par une critique raisonnée des opérations conçues et exécutées par les divers généralissimes des belligérants. *(La République française.)*

N° 8. HENRI CORDIER
Membre de l'Institut

La Chine

Cet ouvrage, divisé en deux parties, donne d'abord la description du pays, traitant en particulier, de l'ethnographie, de la géographie, de la population, des religions, de l'administration, de l'armée, de la marine, des douanes et du commerce, des ports ouverts au commerce étranger, etc.. ; puis il présente l'histoire de la Chine depuis les époques les plus anciennes jusqu'à nos jours.

N° 11. D

D[r] PIERRE BOULAN

Chef du service de radiologie et d'électrothérapie à l'hôpital de Saint-Germain

Les Agents physiques et la Physiothérapie

Le but de ce petit ouvrage est de présenter au lecteur un tableau général de l'étude devenue primordiale en médecine des agents physiques. Kinésithérapie, méthode de Bier, aéro-thermothérapie, cryothérapie, hydrothérapie, photothérapie, électrothérapie, rayons X et corps radioactifs sont successivement étudiés dans une première partie. Une deuxième partie physiothérapique pure expose l'état actuel de nos co .issances relatives aux applications médicales de ces multiples agents. *(Le Progrès Médical.)*

N° 12.

H. LOISEAU

Professeur de langue et de littérature allemandes à l'Université de Toulouse

Le Pangermanisme

Ce qu'il fut - Ce qu'il est

M. Loiseau, professeur de langue et de littérature allemandes à l'Université de Toulouse est par sa profession bien informé du sujet qu'il traite. Son livre, clair et bien documenté, est l'un des meilleurs que l'on puisse recommander aux Français désireux de se renseigner sur cette question vitale. *(Le Polybiblion.)*

N° 13.

ÉMILE BRÉHIER

Maître de conférences à la Sorbonne

Histoire de la Philosophie allemande

La pensée philosophique tend par nature, en Allemagne comme ailleurs, à l'universalité ; elle est, d'intention, rationaliste et humaine avant d'être nationale ; et, si la nationalité lui imprime sa marque, ce n'est en quelque manière que par accident. Ce sont les traits essentiels de cette philosophie que le savant professeur à la Sorbonne a voulu rechercher à travers l'histoire.

N° 20. H. ANDOYER

Membre de l'Académie des Sciences et du Bureau des Longitudes
Professeur à la Sorbonne

L'œuvre scientifique de Laplace

Au moment où des théories nouvelles tentent de battre en brèche l'édifice de la mécanique newtonienne, il est utile qu'un savant éminent présente, telle qu'elle ressort de l'œuvre scientifique immense de Laplace, la conception du système du monde fondée sur la théorie de la gravitation universelle.

N° 21. JEAN BECQUEREL

Professeur au Muséum d'Histoire naturelle

Exposé élémentaire de la Théorie d'Einstein et de sa généralisation

Suivi d'un appendice à l'usage des mathématiciens

Avec 17 figures

Les théories d'Einstein jouent et joueront un tel rôle dans les sciences et la philosophie des sciences de demain que la **Collection Payot** avait le devoir de donner en un volume un résumé de ces théories avec le moins de mathématiques possible. Elle s'est adressée pour cela à un des meilleurs physiciens français.

N° 22. A. BERTHOUD

Professeur de Chimie-Physique à l'Université de Neufchâtel

La constitution des atomes

Avec 18 figures

Le but de cet ouvrage est de donner un exposé concis et élémentaire, mais aussi précis et aussi complet que possible, des connaissances actuelles sur la structure des atomes et la constitution de la matière.

PAYOT, 106, Boulevard Saint-Germain, PARIS

N° 30. F. ROMAN
Chef des travaux de Géologie à l'Université de Lyon
PALÉONTOLOGIE ET ZOOLOGIE

N° 31. ALBERT GRENIER
Professeur d'Antiquités nationales et rhénanes à la Faculté des lettres de l'Université de Strasbourg
LES GAULOIS

N° 32. FÉLIX HENNEGUY
Membre de l'Institut et de l'Académie de Médecine, Professeur au Collège de France
LA VIE CELLULAIRE

N° 33. LOUIS DE LAUNAY
De l'Académie des Sciences
LA TERRE
SA STRUCTURE — SON PASSÉ

N° 34. ADOLPHE DIEUDONNÉ
Conservateur du Département des Médailles et Antiques de la bibliothèque nationale
LES MONNAIES FRANÇAISES

N° 35-36. ÉDOUARD MONTET
Professeur de langues orientales à l'Université de Genève, ancien Recteur
HISTOIRE DE LA BIBLE

N° 37. CHARLES DUGAS
Chargé de cours à l'Université de Montpellier, ancien membre de l'École française d'Athènes
LA CÉRAMIQUE GRECQUE

N° 38. ED. MARCOTTE
Inventeur-Constructeur de phares
LA LUMIÈRE INTENSIVE

N° 39. ERNEST TONNELAT
Professeur à l'Université de Strasbourg
HISTOIRE DE LA LITTÉRATURE ALLEMANDE
(Des origines au XVIIe s.)

N° 40. E. F. GAUTIER
Professeur à l'Université d'Alger
LE SAHARA

N° 41. GEORGES MATISSE
Docteur ès-sciences
LE MOUVEMENT SCIENTIFIQUE CONTEMPORAIN EN FRANCE
II. LES SCIENCES PHYSIOLOGIQUES
(Voir N°s 11-44-45)

N° 42. JEAN BECQUEREL
Professeur au Muséum National d'Histoire Naturelle
LA RADIOACTIVITÉ ET LES TRANSFORMATIONS DES ÉLÉMENTS

N° 43. GEORGES DOTTIN
Correspondant de l'Institut, Doyen de la Faculté des Lettres de Rennes
LES LITTÉRATURES CELTIQUES

N°s 44-45. GEORGES MATISSE
Docteur ès-sciences
LE MOUVEMENT SCIENTIFIQUE CONTEMPORAIN EN FRANCE
III ET IV. LES SCIENCES PHYSIQUES LES SCIENCES MATHÉMATIQUES
(Voir N°s 11-41-44)

N° 46. PH.-E. LEGRAND
Correspondant de l'Institut, Professeur à l'Université de Lyon
LA POÉSIE ALEXANDRINE

N° 47. PAUL MONCEAUX
Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France et à l'École des Hautes-Études
HISTOIRE DE LA LITTÉRATURE LATINE CHRÉTIENNE